

Mathias Röhrmann

„Erörterung von Unterschieden zwischen vorgespannten
und nicht vorgespannten Stabtragwerken aus Stahl
mit Hilfe von Variantenvergleichen“

Diplomarbeit

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences



Fachbereich “Maschinenbau / Feinwerktechnik”

Studiengang „Stahl- und Metallbau“

Magdeburg, 2010

Mathias Röhrmann

„Erörterung von Unterschieden zwischen vorgespannten
und nicht vorgespannten Stabtragwerken aus Stahl
mit Hilfe von Variantenvergleichen“

eingereicht als

Diplomarbeit

an der

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences



Fachbereich "Maschinenbau / Feinwerktechnik"

Studiengang „Stahl- und Metallbau“

Magdeburg, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Laufs
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Hobler

Mathias Röhrmann
Wolfenbütteler Straße 61
D-39112 Magdeburg
Telefon: 0049 (0)151 561 35 849
e-mail: mathimann@web.de

Fachbereich Maschinenbau/Feinwerktechnik
Telefon: 0049 (0)3727 58-1356
Fax: 0049 (0)3727 58-1376

Hochschule Mittweida (FH)
University of Applied Sciences
Technikumplatz 17
09648 Mittweida
Telefon: 0049 (0)3727 58-0
Fax: 0049 (0)3727 58-1379
www.htwm.de
kontakt@htwm.de

Ein Tragwerk beschreibt im Bauwesen das statische Gesamtsystem der Tragglieder, die maßgeblich für die Standsicherheit eines Bauwerks sind [1]. Man versteht darunter eine bauliche Struktur, die aufgrund ihres Tragwiderstandes und ihrer konstruktiven sowie technologischen Durchbildung, neben ihrem Eigengewicht auch Lasten und Kräfte aus der widmungsgemäßen Nutzung, sicher in feste Auflagerpunkte (z.B. Fundamente) abtragen kann [2]. Da Tragwerke immer für bestimmte Zwecke errichtet werden, müssen diese ihre vorgegebenen Aufgaben erfüllen und unterscheiden sich nach dem Umfang, in dem sich das Tragwerk an der Erfüllung der Bauwerksfunktion beteiligt. Diese Diplomarbeit befasst sich nur mit Tragwerken, die ausschließlich eine Tragfunktion (z.B. als Stützen, Riegel, Fachwerkkonstruktionen, ...) erfüllen. Tragwerke erfüllen neben der Tragfunktion natürlich auch raumbildende Funktionen (z.B. Hallen und Dächer) bzw. alle wesentlichen Funktionen (Brücken, Schornsteine, Silos, ...) in Bauwerken, welche wie bereits erwähnt, in dieser Arbeit keine Verwendung finden sollen.

0. Inhaltsverzeichnis

0.	Inhaltsverzeichnis	
1.0	Einleitung	3
1.1	Allgemeines	3
1.1.1	Zielstellung der Diplomarbeit	4
1.1.2	Abgrenzung der Diplomarbeit	4
2.0	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Tragwerkelemente	5
2.2	Einwirkungen und Wirkungsweisen verschiedener Tragwerksformen	7
2.3	Grundlagen zur Bemessung und Konstruktion	10
3.0	Vorspannung von Tragwerken	13
3.1	Wirkprinzip und Sinn vorgespannter Tragwerke	13
3.2	Einfluss der Vorspannung auf Tragwerke	14
3.3	Spannvorgang	15
3.3.1	Konstruktionselemente der Vorspannung	16
3.3.2	Beschreibung des Spannvorgangs	18
3.3.3	Spannverfahren „SUSPA-Draht EX“	18
3.4	Berücksichtigung der Vorspannung in der Bemessung von Tragwerken	19
4.0	Variantenuntersuchung	21
4.1	Randbedingungen und Einwirkungen	21
4.2	Darstellung ausgewählter Tragwerkformen	23
4.2.1	Nicht vorgespannte Stabtragwerke	26
4.2.1.1	Variante 1 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	26
4.2.1.2	Variante 2 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	28
4.2.1.3	Variante 3 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	30
4.2.1.4	Variante 4 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	30
4.2.2	Vorgespannte Stabtragwerke	31
4.2.2.1	Variante 1 – Vorgespanntes Stabtragwerk	33
4.2.2.2	Variante 2 – Vorgespanntes Stabtragwerk	35
4.2.2.3	Variante 3 – Vorgespanntes Stabtragwerk	39
4.2.2.4	Variante 4 – Vorgespanntes Stabtragwerk	40
4.3	Untersuchung der einzelnen Varianten	42
4.3.1	Nachweis der Tragfähigkeit	42

4.3.1.1	Variante 1 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	43
4.3.1.2	Variante 2 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	47
4.3.1.3	Variante 3 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	51
4.3.1.4	Variante 4 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	52
4.3.1.5	Variante 1 – Vorgespanntes Stabtragwerk	54
4.3.1.6	Variante 2 – Vorgespanntes Stabtragwerk	58
4.3.1.7	Variante 3 – Vorgespanntes Stabtragwerk	64
4.3.1.8	Variante 4 – Vorgespanntes Stabtragwerk	68
4.3.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	70
4.3.2.1	Variante 1 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	70
4.3.2.2	Variante 2 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	72
4.3.2.3	Variante 3 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	73
4.3.2.4	Variante 4 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk	74
4.3.2.5	Variante 1 – Vorgespanntes Stabtragwerk	74
4.3.2.6	Variante 2 – Vorgespanntes Stabtragwerk	76
4.3.2.7	Variante 3 – Vorgespanntes Stabtragwerk	78
4.3.2.8	Variante 4 – Vorgespanntes Stabtragwerk	79
4.3.3	Sonstige Nachweise	79
4.3.3.1	Gestaltsfestigkeitsnachweis für Hohlprofile	80
5.0	Variantenvergleich	88
5.1	Vergleichskriterien	88
5.1.1	Vergleich unter dem Aspekt der Konstruktivität	89
5.1.2	Vergleich unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit	90
5.1.3	Vergleich unter dem Aspekt des Tragverhalten	91
6.0	Konstruktive Details	92
6.1	Konstruktives Detail „Knotenpunkte“	93
6.2	Konstruktives Detail „Querschnitte“	96
6.3	Konstruktives Detail „Auflager“	102
7.0	Zusammenfassung	104
8.0	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	106
9.0	Quellenangaben	109
10.0	Selbstständigkeitserklärung	111

1.0 Einleitung

Das Zusammenwirken aller Bauwerkkomponenten mit Tragfunktion bildet das Tragwerk. Dieses so entstehende Modell wird auch als Tragstruktur bezeichnet da es zu verschiedensten Abstraktionsstufen entwickelbar ist.

Der Entwurf für tragende Konstruktionen wird dabei aber von mehreren Faktoren beeinflusst und hat maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Tragkonstruktion. In einer Zeit, in der Rohstoffe immer knapper bzw. begehrter werden ist man auf der Suche nach Möglichkeiten zur Materialeinsparung ohne das Tragverhalten einer Konstruktion negativ zu beeinflussen. Diese Diplomarbeit befasst sich mit einer Möglichkeit der Materialeinsparung an Tragwerken und vergleicht diese Varianten hinsichtlich ihrer Konstruktivität und Wirtschaftlichkeit. Dabei handelt es sich um Tragwerke aus Stahl, welche durch Vorspannung ihrer Tragwerkeigenschaften erheblich verbessern. Die Technik des Vorspannens, an Elementen des Stahlbaus, steckt noch in den Anfängen und ist in der Literatur eher selten zu finden. In der vorliegenden Arbeit wird auf die Grundlagen der Tragwerksberechnung, den Stand der Technik für Vorspannvorgänge und auf Variantenvergleiche verschiedener Tragwerksformen eingegangen.

1.1 Allgemeines

Diese Diplomarbeit entstand nicht wie vielleicht üblich in Kooperation mit einem bestimmten Unternehmen und ist auch kein von der Hochschule, z.B. für Forschungszwecke, vorgegebenes Thema. Diese hier vorgelegte Abschlussarbeit entstand sozusagen aus eigener Neugier bzw. gewecktem Interesse.

Bevor sich diese Arbeit allerdings mit dem eigentlichen Kernthema befasst möchte ich im allgemeinen Teil meine Danksagung platzieren:

Ich möchte mich zu allererst bei den Professoren und Mitarbeitern der Hochschule Mittweida bedanken, die für Gerechtigkeit an der Hochschule stehen und es durch ihr Engagement ermöglicht haben, dass ich zum Schreiben dieser Abschlussarbeit berechtigt bin. Des weiteren möchte ich mich natürlich bei allen Institutionen, Professoren und Personen bedanken, die mir während der Bearbeitungszeit dieser Arbeit unterstützend mit Rat, Tat und offenen Ohren zur Seite gestanden haben.

1.1.1 Zielstellung der Diplomarbeit

Ziel dieser Diplomarbeit ist es Variantenvergleiche nicht vorgespannter und vorgespannter Tragwerkkonstruktionen aus Stahl unter dem Aspekt der Konstruktivität und Wirtschaftlichkeit durchzuführen. Dabei soll auch auf die Auswirkungen (z.B. die Stützweite, Materialeinsparung) und auf die Realisierung (der Spannvorgang, Spannelemente) der Vorspannungen eingegangen werden.

Zur Realisierung werden Grundlagen der Stabtragwerke erläutert, Strukturen für Beispieltragwerke generiert und unter den o.g. Aspekten miteinander verglichen.

1.1.2 Abgrenzung der Diplomarbeit

Die Grundlage dieser Diplomarbeit bilden aktuelle Normen wie die DIN, EN und ISO und die im begrenzten Maße vorgefundene Fachliteratur (siehe Quellenverzeichnis). Die vorgelegte Arbeit beschränkt sich dabei auf die Grundlagen von Tragwerkkonstruktionen, die Vorspannung von Tragwerkkonstruktionen, die Variantenuntersuchung von Tragwerken und ein Variantenvergleich am Beispiel von Tragwerken in Form von Fachwerkträgern. Es wird sich ausschließlich mit Tragwerken befasst, deren Tragstrukturen durch Stäbe gebildet werden, d.h. mit Stabtragwerken. Aufgrund der zu erwartenden Komplexität beschränkt sich diese Arbeit dabei auf eine Ebene und klammert die räumlichen Stabtragwerke aus. Stabtragwerke sind dabei immer aus Stäben bzw. Stabelementen, Knotenpunkten sowie Auflager bzw. Stützungen aufgebaut. Die Wirkungsweisen dieser drei Konstruktionselemente werden im Kapitel 2.1 kurz erläutert.

2.0 theoretische Grundlagen [2], [3], [4]

Tragwerke bezeichnen im Bauwesen ein statisches Gesamtsystem mehrerer Tragglieder, welche maßgeblichen Einfluss auf die Standsicherheit eines Bauwerks haben. Tragwerke bestehen dabei in der Regel aus Balken, Stützen und zugehörigen Knoten- sowie Auflagerpunkten und können als einzelne Stäbe oder komplexe Rahmen betrachtet werden. Die Baustatik unterscheidet dabei zwischen zwei großen Gruppen von Tragwerken. Man spricht hierbei von Stab- und Fachwerken

(bestehend aus Pfosten, Riegeln und Rahmen) und den Flächentragwerken (bestehend aus Platten, Scheiben und Schalen). Diese Diplomarbeit wird sich ausschließlich der Gruppe der Stab- und Fachwerke widmen, wobei die Fachwerkkonstruktionen im Vordergrund stehen sollen.

Fachwerke stellen aber nur eine von vielen Konstruktionsvarianten für Ingenieure und Architekten im Bauwesen dar. Sie werden in den verschiedensten Bereichen, wie z.B. im Wohnungsbau, im Brückenbau und selbstverständlich auch im Hallenbau eingesetzt und können aus verschiedenen Materialien erstellt werden. Die bekanntesten Rohstoffe bieten dabei sicherlich Holz, Stahl, Beton und Kombinationswerkstoffe wie Stahlbeton.

2.1 Tragwerkelemente

Trag- bzw. Fachwerkkonstruktionen bestehen aus Stäben, deren räumliche Anordnungsrichtung nicht begrenzt ist, Knotenpunkte die zur gelenkigen Verbindung dieser, in ihrer auftretenden Anzahl unbegrenzten, Stäbe dienen und Auflager bzw. Stützungen. Mit diesem Grundsatz betrachtet, entstehen Fachwerke immer durch eine Aneinanderreihung mehrerer Dreiecksgebilde (siehe Abbildung 2.1.1), ausgehend von einem Grunddreieck.

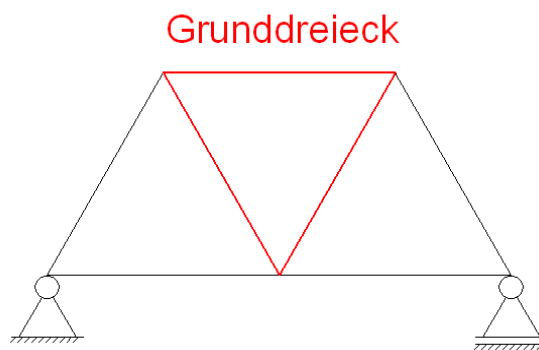


Abbildung 2.1.1 Grunddreieck in Stabtragwerken

Innerhalb einer solchen Fachwerkkonstruktion werden anhand ihrer Lage und Funktion die Stäbe in Diagonalstreben und/oder Vertikalstützen und Ober- bzw. Untergurte unterteilt (siehe Abbildung 2.1.2). Dabei verlaufen die Diagonalstreben und die Vertikalstützen immer zwischen den Ober- bzw. Untergurten, ganz unabhängig von der Fachwerkform und dem Fachwerktyp (Beispiele siehe Kap. 2.2).

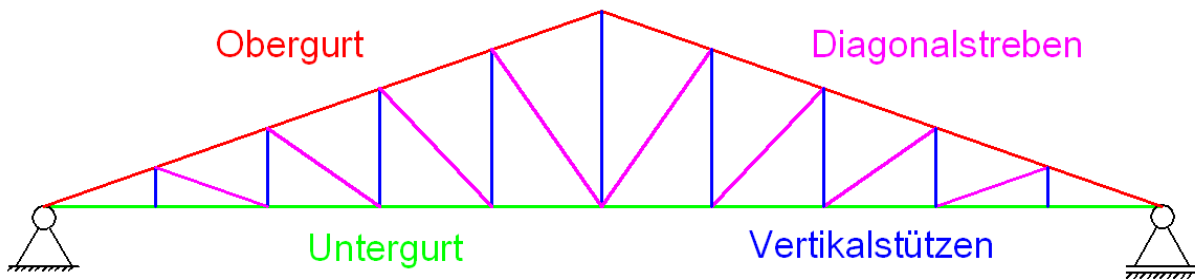


Abbildung 2.1.2 Beispieltragwerk inkl. Darstellung der Grundelemente

Würden zwischen Ober- und Untergurt nur vertikale Verbindungsstäbe und keine Diagonalstreben angeordnet, so könnten diese nichts anderes bewirken als nur die gleichstarke Durchbiegung von Ober- und Untergurt. Erst wenn auch schräge Stäbe mit dem Ober- und Untergurt und eventuell auch den Vertikalstäben ein System aus Dreiecken bildet, entsteht ein wirksames Fachwerk.

Als Stäbe, oft auch als Linienträger, bezeichnet man Tragelemente, deren Dicken und Breiten klein ausfallen im Verhältnis zu ihrer Länge bzw. Stützweite. Stäbe sind daher eindimensionale Tragelemente, die aus einer Stabachse und einem Stabquerschnitt bestehen und überaus vielfältige Formen besitzen können. Die Stabachse von stabförmigen Tragelementen kann gerade oder gekrümmt in einer Ebene liegen, aber auch gemäß einer Raumkurve verlaufen.

Den wohl wichtigsten und daher einen nicht unwesentlichen Teil beim Zusammenspiel von Stäben in einem Fachwerkträger nehmen die Knotenpunkte ein, da sich diese der Kraftübertragung und Lasteinleitung widmen.

Findet die Lasteinleitung ausschließlich in den Knotenpunkten statt und wird das Eigengewicht vernachlässigt, so spricht man von einem „idealen Fachwerk“ da lediglich Zug- oder Druckkräfte in den Stäben auftreten. Aufgrund der Tatsache, dass diese Knotenpunkte alle Stäbe innerhalb eines Fachwerkssystems miteinander verbinden und die Kraftübertragung von Stab zu Stab realisieren ist deren Gestaltung oftmals ein Problem für viele Tragwerksplaner.

Bei den später folgenden Vergleichsrechnungen wird von gelenkigen Verbindungspunkten ausgegangen. Diese übertragen keine Momente, sondern nur Normalkräfte von Stab zu Stab.

Nun folgt eine Erläuterung zu den Auflagern bzw. Stützungen von Stabtragwerken. In den überwiegenden Anwendungsfällen werden Tragwerke punktuell gelagert und daher wie vollwandige Biegeträger betrachtet. Dabei spricht man von der üblichen Idealisierung von Stabtragwerken durch Gelenklager.

Die aufgrund der Konstruktionsweise verhältnismäßig wenigen, aber auftretenden Biegemomente verteilen sich auf die im Fachwerk beliebig angeordneten Stäbe. Die möglichen Auflagerpunkte bzw. die notwendigen Freiheitsgrade beschränken sich in den folgenden Vergleichsrechnungen auf ein festes Gelenklager (mit einem Freiheitsgrad) und ein verschiebliches Gelenklager (mit zwei Freiheitsgraden). Wirkliche Auflagerkonstruktionen besitzen natürlich stets ein räumliches Stützungsvermögen.

2.2 Einwirkungen und Wirkungsweisen verschiedener Tragwerksformen

Die Einwirkungen auf Tragwerke, in Form von Fachwerken, können aufgrund der verschiedensten Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten leicht variieren und die gebräuchlichsten werden in diesem Kapitel kurz grundlegend erläutert.

Aufgrund ihrer Wirkungsdauer bzw. -häufigkeit unterscheidet man diese Einwirkungen nach unveränderlichen bzw. ständigen und veränderlichen Lasten. Unvermeidbar und zur Gruppe der unveränderlichen Lasten zählend, ist bei Tragwerkkonstruktionen aller Art die Eigenlast. Die Eigenlast resultiert aus dem Eigengewicht der Tragkonstruktion, welches ständig auf das statische System wirkt. Da jeder Körper eine Masse hat und dessen resultierende Gewichtskraft auf ein Tragwerk einwirkt, wird die Eigenlast bei statischen Berechnungen immer bei dem zu führenden Nachweis berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den unveränderlichen bzw. ständigen Lasten werden die veränderlichen Lasten bei statischen Berechnungen nur dann berücksichtigt, wenn sie sich für den zu führenden Nachweis ungünstig auswirken. Mehrere veränderliche Lasten, welche gleichzeitig ungünstig auf Tragwerke einwirken werden zu verschiedenen Lastkombinationen zusammengefasst und durch mindernd wirkende Lastfaktoren berücksichtigt.

Die nun folgenden Lasten zählen alle zur Gruppe der veränderlichen Lasten da diese mehr oder weniger beeinflussbar bzw. in ihrer Wirkungsdauer oder ihrem Wirkungszeitpunkt variabel/unbeständig auf das Tragwerk einwirken.

Die Nutzlast oder auch Verkehrslast genannt bezeichnet eine veränderliche oder bewegliche Einwirkung auf ein Bauteil. Diese kann infolge von Personen, Fahrzeugen, Maschinen oder Einrichtungsgegenständen auftreten. [1] Da Nutzlasten in ihrer Intensität und Wirkungsdauer stark variieren werden sie in verschiedene

Kategorien unterschieden und sind für Hochbauten im Stahlbau diversen Bautabellen als Flächen- oder Einzellast zu entnehmen.

Eine weitere und nicht selten unterschätzte veränderliche Einwirkung ist die Schneelast, resultierend aus Schnee oder Eis. Diese kann ebenfalls in Intensität und Dauer stark variieren und gilt trotz ihrer Erfahrungswerte als ziemlich unberechenbar. Diese Unberechenbarkeit resultiert daraus, dass es sich bei dieser veränderlichen Belastung um eine klimatisch bedingte Einwirkung handelt, die stark von der geographischen Lage und Bauform der Tragwerke abhängt. Die im allgemeinen als Flächenlast auftretende und senkrecht zum Boden wirkende Schneelast wirkt in der Realität entsprechend ihrer verschiedenen Dichten relativ ungleichmäßig

Eine weitere, aufgrund der klimatischen Bedingungen, schwer einschätzbare Einwirkung ist die Windlast. Sie wirkt sich als Druck- oder Sogkraft um ein Tragwerk herum aus, welches der Windströmung und Nachlaufwirbel ausgesetzt ist. Die Belastungen durch Wind werden ebenfalls als Flächenlast angesetzt mit der Besonderheit, dass sie senkrecht zur Angriffsfläche wirken. Entsprechend der geographischen Bedingungen bilden Windzonenkarten die Grundlage zur Annahme der zu erwartenden Windgeschwindigkeiten für Windlasten.

Kräfte bzw. Belastungen, die in Abhängigkeit von den Stoffeigenschaften wirken, wie z.B. Längenänderungen aus Temperaturschwankungen, Trocknen oder Schwinden bleiben in den Berechnungen unberücksichtigt. Des weiteren bleibt eine andere Gruppe der veränderlichen Lasten unberücksichtigt, die dynamischen Lasten, wie z.B. Anpralllasten und Schwingungen.

Betrachtet man die Wirkungsweise von Stabtragwerken, die in den meisten Fällen punktuell gelagert sind, so erkennt man auf den ersten Blick, dass diese eigentlich der Wirkungsweise eines vollwandigen Biegeträgers entsprechen. Die auftretenden Biegemomente werden dabei auf die Fachwerkstäbe übertragen und aufgrund der gelenkigen Knotenpunkte erhalten diese Stäbe überwiegend Zug- Druckkräfte. Da jeder dieser Stäbe einzeln betrachtet und bemessen werden kann, lassen sich Stabtragwerke optimal auslasten. Gegenüber vollwandiger Tragwerkskonstruktionen führt dies zur Materialeinsparung und nicht selten zu einer wirtschaftlicheren Lösung. Weitere Vorteile der Tragwerkskonstruktionen sind die Reduzierung des Eigengewichts und die daraus resultierende Vergrößerung der Stützweiten. Die Optimierung bzw. durch Vorspannung erreichbaren Stützweiten im Vergleich zu nicht vorgespannten Stabtragwerken in Form von Fachwerkträgern auf zwei Stützen wird als Kernthema dieser Diplomarbeit in später folgenden Kapiteln erläutert.

Die Tragkonstruktion z.B. in Form eines Fachwerks wird durch die auftretenden Kräfte in vertikaler und horizontaler Richtung bestimmt. Die Ablastung erfolgt dabei durch das Zusammenwirken der Stäbe und Knoten in einem Verband bzw. Stabtragwerk. Die Ober- bzw. Untergurte dienen überwiegend zur Ableitung der vertikal wirkenden Lasten in die Pfosten und Diagonalstreben die ebenfalls noch Stabilisierungskräfte aufnehmen. Betrachtet man ein Stabtragwerk in Form eines Fachwerkträgers in der Ebene, bei Vernachlässigung der räumlichen Wirkung, so verbleibt ein statisch bestimmtes System mit 3 Auflagerkräften bzw. -reaktionen. Einige Grundformen für solche Stabtragwerke sind in nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

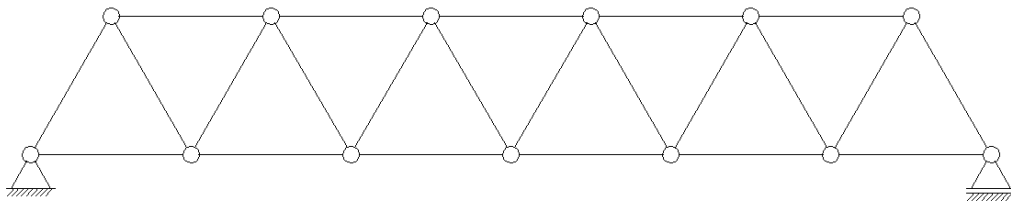


Abbildung 2.2.1 stützenfreier Parallelträger

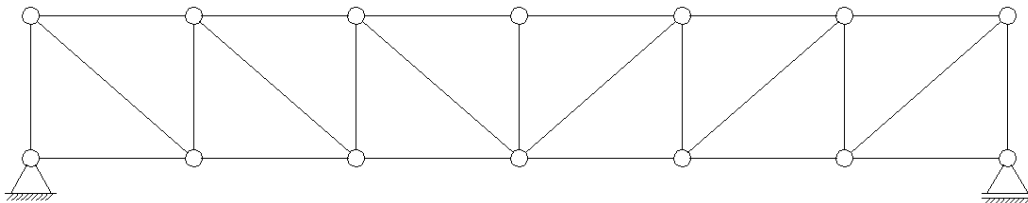


Abbildung 2.2.2 Parallelträger

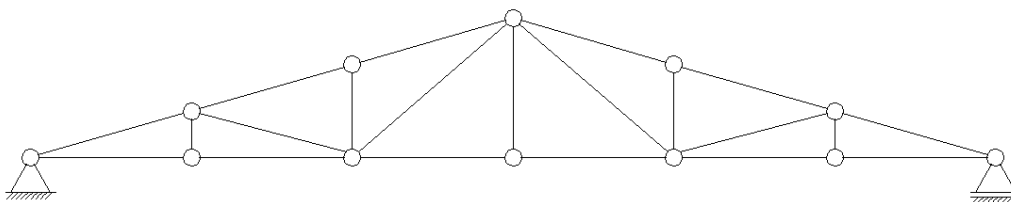


Abbildung 2.2.3 Dreiecksträger

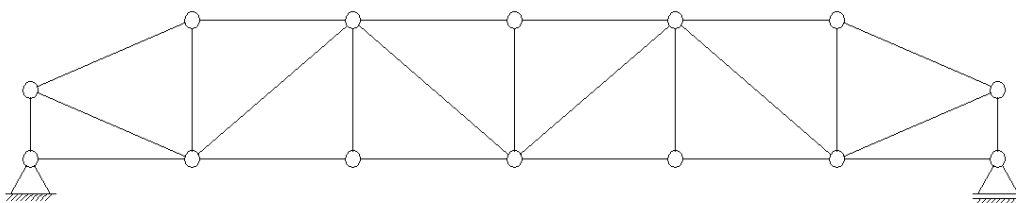


Abbildung 2.2.4 Trapezträger

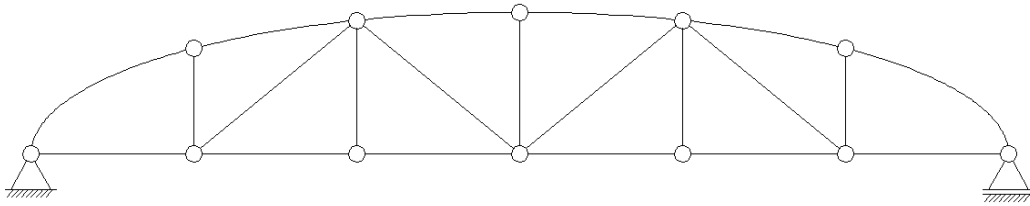


Abbildung 2.2.5 Parabelträger

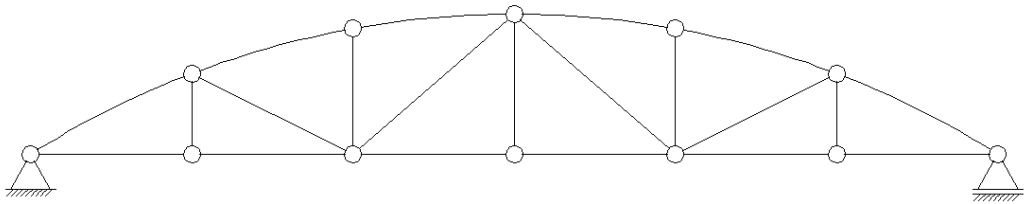


Abbildung 2.2.6 Polygonträger

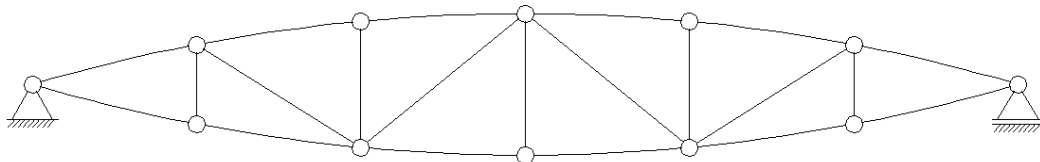


Abbildung 2.2.7 Fischbauchträger

2.3 Grundlagen zur Bemessung und Konstruktion

Ein Fachwerk entsteht aus der Verbindung mehrer Stäbe in Knotenpunkten und aufgrund dieses Prinzips entstehen für die einzelnen Elemente nur Zug- und Druckkräfte. Dieses Wirkprinzip von Fachwerkkonstruktionen ist Grundlage für die relativ hohe Tragfähigkeit bei gleichzeitig geringem Eigengewicht.

Für Tragwerksplaner gilt es die Vorteile, wie eine Gewichtsersparnis mit den (wenigen) Nachteilen, z.B. einer größeren räumlichen Ausdehnung im Vergleich zu Vollwandträgern, abzuwiegen. Ein weiterer kritischer Punkt für Tragwerksplaner ist, aufgrund ihrer kraftübertragenden Funktion, die Gestaltung der Knotenpunkte. Bei der Berechnung und Bemessung von Stabtragwerken kann von einer gelenkigen Lagerung der Stäbe in den Fachwerkknoten ausgegangen werden [5]. Dies entspricht zwar nicht dem realen Tragwerksverhalten, da Stabanschlüsse in den Knotenpunkten theoretisch auch Biegemomente übertragen bzw. aufnehmen, aber aufgrund der Tatsache, dass die einzelnen Tragwerkstäbe einen relativ kleinen Querschnitt im Vergleich zu ihrer Länge haben, können diese Biegemomente vernachlässigt und auftretende Spannungsspitzen durch Plastizierung aufgenommen

werden. Für die Schnittgrößenermittlung der einzelnen Tragwerksstäbe stehen dem Tragwerksplaner verschiedene Verfahren zur Verfügung. Neben rechnergestützter Software gibt es Verfahren wie z.B. dem Ritterschnittverfahren, dem Rundschnitt- bzw. Knotenpunktverfahren und dem Cremonaplan.

Beim Ritterschnittverfahren wird das Tragwerk in zwei Teile zerschnitten und zwar genau so, dass maximal 3 Stäbe durchtrennt werden. Für diese Stäbe, von denen sich jeweils 2 in einem Knotenpunktschneiden müssen, werden die Kräfte anhand der Gleichgewichtsbedingungen betrachtet und in drei linear unabhängigen Gleichungen aufgestellt.

Mit dem Rundschnittverfahren lassen sich die einzelnen Stabkräfte ebenfalls durch das Aufstellen eines Gleichungssystems ermitteln. Für jeden Knoten werden hierzu zwei Gleichgewichtsbedingungen (die Summe der Kräfte in x- und y-Richtung muss Null sein) aufgestellt und gelöst. Bei einfachen Tragwerken werden daher zuerst die Auflagerkräfte bestimmt und anschließend, von den Auflagern ausgehend, Knoten für Knoten betrachtet und die Stabkräfte bestimmt.

Die Stabkraftermittlung mittels Cremonaplan geschieht durch zeichnerische Darstellung der einzelnen Knotenpunkte von statisch bestimmten Tragwerken. Das Grundprinzip beruht auf der Tatsache, dass an jedem Knotenpunkt ein Gleichgewicht herrschen muss und die Summe der dazugehörigen Stabkräfte Null sein muss. Diese Stabkräfte lassen sich in einem geschlossenen Krafteck zeichnerisch darstellen und durch das Zusammenfügen dieser Kraftecke entsteht der Cremonaplan.

Eine genauere Beschreibung der Funktions- bzw. Vorgehensweise dieser drei Verfahren zur Stabkraftermittlung wird an dieser Stelle nicht vorgenommen und ist den entsprechenden Literaturbeiträgen zu entnehmen.

Die Tragwerksberechnungen innerhalb dieser Diplomarbeit werden mittels der Berechnungssoftware „RSTAB“ von der Firma Dlubal-Ingenieur-Software durchgeführt.

Nach Ermittlung der Stabkräfte und einzelnen Schnittgrößen werden die einzelnen Stäbe dimensioniert und Querschnitte bestimmt. Es ist dabei grundsätzlich nachzuweisen, dass die vorhandenen Beanspruchungen z.B. Spannungen die zulässigen Beanspruchbarkeiten nicht überschreiten. Die Spannungsnachweise erfolgen dabei nach DIN 18800-1 [7.5.2] für Zugstäbe und für Druckstäbe zusätzlich nach DIN 18800-2 [3.1ff]. Dabei ist die Querschnittsfläche für Zugstäbe und die Stablänge für Druckstäbe maßgebend, die Knicklängenbestimmung erfolgt dabei nach DIN 18800-2. Des weiteren können die einzelnen Stäbe in und aus der

Fachwerkebene knicken, was bedeutet, dass die Trägheitsmomente in x- und y-Richtung beachtet werden müssen. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Auswahl der Profilquerschnitte starken Einfluss auf die Umsetzung der Knotenpunkte hat. Bei der Dimensionierung des Gesamtfachwerks ist auf ein sinnvolles und wirtschaftliches Verhältnis zwischen der Höhe und der Länge zu achten. Die Anzahl der Stäbe ist zu minimieren, da jeder Knotenpunkt den Fertigungsaufwand erhöht. Diese genannten Faktoren haben direkten Einfluss auf die Kosten und somit auf die Wirtschaftlichkeit der Gesamtkonstruktion.

Betrachtet man die Ausbildung des Stabtragwerks aus Sicht der Stabilität so ist z.B. auf einen möglichst geradlinigen Verlauf der Stäbe und eine Symmetrie der Stabquerschnitte zur Stabwerkebene zu achten, um die Knickstabilität nicht unnötig zu verringern. Des weiteren sollte der Winkel zwischen den Stäben ca. 30° nicht unterschreiten, da dies die Stabkräfte maximiert, große Knotenpunkte gestaltet werden müssen und die Knotensteifigkeit unvorteilhaft ansteigt.

Für den Tragwerksplaner sind neben den wirtschaftlichen und statischen Aspekten natürlich auch ausführungstechnische bzw. gestalterische Aspekte, sowie die Transportmöglichkeiten von großer Bedeutung. Ein in Einbaulage stabiles Stabtragwerk muss stets auch für einen Transport zu Luft, Land oder Wasser geeignet sein.

Es lässt sich noch anmerken, dass der Stabquerschnitt im Verhältnis zur Stablänge sehr klein zu wählen ist um die Annahme der gelenkigen Knotenanschlüsse vertreten zu können. Dimensioniert man die Ober- und Untergurte, so sind diese entsprechend der größten Stabkraft durchgehend konstant) auszuwählen, die Vertikalstützen und Diagonalstreben hingegen sind voneinander unabhängig und entsprechend ihrer Auslastung zu konstruieren. Die Verbindung und Lastübertragung der einzelnen Stäbe übernehmen wie bereits kurz erwähnt die Knotenpunkte, welche ebenfalls durch Spannungsnachweise nachzuweisen sind. Diese können unterschiedlichst ausgeführt werden, mit oder ohne Knotenbleche, geschweißt oder geschraubt und auch geschmiedete Formteile sind keine Seltenheit mehr um den Kraftverlauf nicht negativ zu beeinflussen. Die Ausführung der Knoten, die stark von den gewählten Querschnitten der Stäbe abhängig ist, hat somit sehr großen Anteil an den Gesamtkosten einer Tragwerkskonstruktion.

Dieses Kapitel hat hoffentlich verdeutlicht wie viele Möglichkeiten einem Tragwerksplaner zur Verfügung stehen und wie seine Entscheidungen die Wirtschaftlichkeit und Stabilität eines Stabtragwerkes beeinflussen. Diese „Freiheiten“ führen nicht selten zu Konflikten unter Tragwerksplanern bzw. Architekten und Statikern.

3.0 Vorspannung von Tragwerken

Das Vorspannen von Bauteilen bzw. in Bauwerken und die resultierenden Vorteile macht sich der Mensch im 21. Jahrhundert regelmäßig zum Nutzen. Diese durchaus sinnvolle Methode findet allerdings bisher überwiegend im Betonbau Anwendung. Im Gegensatz zum Spannbeton ist bei Bauwerken aus Stahl das Prinzip des Vorspannens noch nicht weit verbreitet. Das Vorspannen von Tragwerken aus Stahl hat große Ähnlichkeit mit Zugseilen an Seilbrücken bzw. kommt generell bisher fast ausschließlich an Brückenkonstruktionen zu Einsatz.

Obwohl die Berechnung und Anwendung vorgespannter Tragwerke aus Stahl prinzipiell möglich ist, ist sie weder in der Praxis noch in der Fachliteratur weit verbreitet. Die Gründe für die seltene Verwendung sind allerdings nicht bekannt.

3.1 Wirkprinzip und Sinn vorgespannter Tragwerke

Das Vorspannprinzip beruht auf der Tatsache, dass durch zusätzliche Bauteile Kräfte in das Gesamtsystem geleitet werden, die den normalen Beanspruchungen entgegenwirken. Am Beispiel der Tragstabwerke werden zusätzliche Spannelemente in die Stäbe integriert. Durch das Überlagern der Spannkraft und Kräfte infolge der äußeren Einwirkungen, werden die Spannungen im Gesamtsystem an einigen Stellen verringert. Dabei ist es möglich einzelne Stäbe oder ganze Stahlkonstruktionen mittels zusätzlicher Spannelemente vorzuspannen.

Stabtragwerke in Form von Fachwerkträgern gehören zu den am häufigsten vorgespannten Stahlkonstruktionen. Diese unterscheiden sich dabei nur minimal von den nichtvorgespannten Konstruktionen an den Verankerungs- und Umlenkpunkten. Entsprechend ihrem Verlauf im Gesamtsystem benötigen die Spannelemente weitere Führungspunkte die ebenfalls im Bereich der Knotenpunkte angebracht werden

müssen um eine optimale Krafteinleitung in das Gesamtsystem zu gewährleisten und keine unnötigen Biegemomente auftreten zu lassen. Der Verlauf von Spannelementen kann dabei auf verschiedenste Weisen erfolgen, wirklich sinnvoll ist allerdings nur ein geradliniger oder polygonaler Verlauf der Spannelemente.

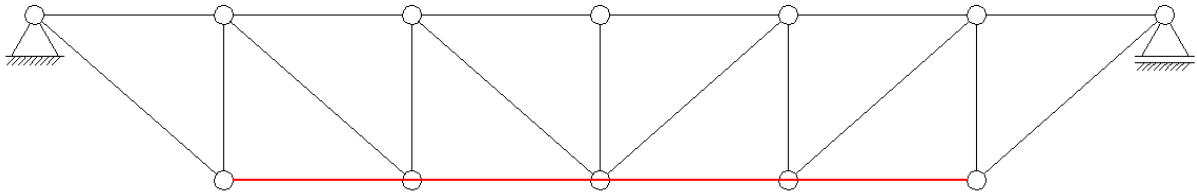


Abbildung 3.1.1 Gerader Verlauf

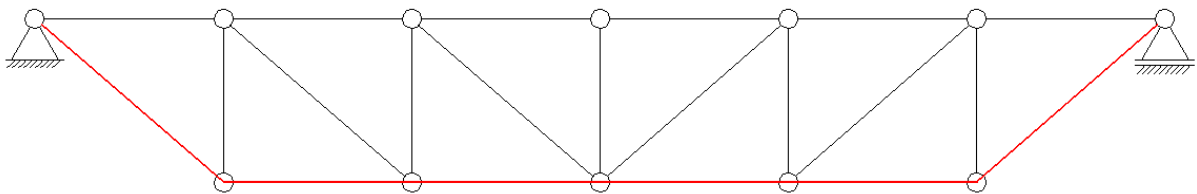


Abbildung 3.1.2 Polygonaler Verlauf

An den Verbindungsstellen zwischen der Stahlkonstruktion und den Spannelementen werden wie bereits erwähnt Kräfte ins Gesamtsystem geleitet, welche den Effekt der Vorspannung hervorrufen. Eine optimale Wirkungsweise wird dabei durch den Verlauf der Spannelemente und die eingesetzte Kraft maßgeblich beeinflusst.

3.2 Einfluss der Vorspannung auf Tragwerke

Bei einem geradlinigen Verlauf (siehe Abb. 3.1.1) bewirkt die Vorspannung eine direkte Einleitung von Druckkräften in den Unterzug. Ein solcher Verlauf ist sinnvoll, wenn Zugkräfte in den entsprechenden Stäben wirken und sich durch die Überlagerung mit den Druckkräften reduzieren.

Bei einem, wie in Abbildung 3.1.2 dargestellten Verlauf der Spannelemente wirken zusätzlich noch resultierende Kräfte (R) in den Umlenkstellen auf die Konstruktion (siehe Abb. 3.2) und erzeugen eine Biegebeanspruchung im Tragwerk, welche entgegengesetzt der eigentlichen Beanspruchungsrichtung wirkt. Dies hat die unterschiedlichsten Auswirkungen auf alle Stäbe der Tragkonstruktion

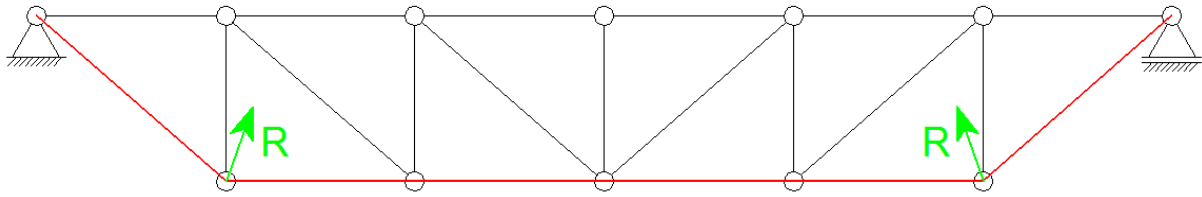


Abbildung 3.2 Kräfte aus polygonalem Verlauf

und bewirkt eine Verringerung der Gesamtverformung bzw. Durchbiegung des Systems. Die Schnittgrößen sind somit durch das Einbringen von Vorspannkräften beeinflussbar. Je mehr Stäbe dabei erfasst bzw. beeinflusst werden, umso größer ist die Auswirkung auf z.B. die Abmessungen, die Verformung, den Materialbedarf und eine eventuelle Kostenreduzierung.

Neben den aufgeführten Vorteilen muss man natürlich auch die Nachteile ansprechen. Ein Problem der vorgespannten Tragwerkstrukturen ist der höhere Aufwand bei der Planung, Konstruktion, Fertigung und Montage insbesondere durch den Spannvorgang, welcher nachfolgend noch detaillierter erwähnt wird. Weitere Beachtung sollten die empfohlenen Kontrollen während der Einsatzzeit und der damit verbundene Überwachungsaufwand z.B. für die Spannkraftkontrollen finden. Dies alles verursacht natürlich Kosten, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen und den möglichen Kostenersparnissen, aus den Vorteilen, gegenüberzustellen sind.

3.3 Spannvorgang

In diesem Kapitel soll der Spannvorgang näher erläutert werden. Dabei wird zu allererst auf die Konstruktionselemente als Grundbausteine eingegangen und anschließend der Spannvorgang und dessen Besonderheiten beschrieben.

Wird innerhalb dieser Diplomarbeit von „Vorspannung“ gesprochen, so spricht man über eine externe Vorspannung ohne Verbund wie es beim Stahlbetonbau angewendet wird. Die Spannglieder aus Stahl bilden also, abgesehen von den Verankerungs- und Umlenkstellen, keinen Verbund mit der Tragwerkstruktur. Dies hat unter anderem den Vorteil, dass die eingesetzten Spannelemente zu Wartungszwecken im Großen und Ganzen zugänglich bleiben; eventuell auftretende Verluste durch Relaxation (Spannungsverlust unter Belastung während einer bestimmten Zeit) sind somit nachweisbar.

Ein etablierter Hersteller und Entwickler für Produkte zum Vorspannen von Stahl- oder Betonkonstruktionen ist die Firma DYWIDAG-Systems International GmbH, früher eher bekannt als SUSPA-DSI GmbH. Die in dieser Diplomarbeit durchgeführten Berechnungen zu externen Vorspannungen basieren daher auf Produkte der Firma DYWIDAG, speziell das Spannverfahren „SUSPA-Draht EX“.

3.3.1 Konstruktionselemente der Vorspannung

Die Spann- oder Konstruktionselemente gibt es mittlerweile von verschiedenen Herstellern, in verschiedenen Ausführungen und natürlich aus verschiedenen Werkstoffen. Die Grundbausteine einer jeden Vorspannung werden in diesem Kapitel aufgeführt und kurz erläutert.

Das erste und wichtigste Grundelement zum Vorspannen von Tragwerken sind die *Spannglieder*. Diese bestehen in der Regel aus hochfesten Seilen oder Zugstäben, welche als Spannlitzen, Spanndrähten oder Spannstäben zum Einsatz kommen. Das Abspannen durch Stahlseile kommt seit vielen Jahren im Brückenbau zum Einsatz ist beim Vorspannen, wie es in dieser Diplomarbeit dargestellt wird, allerdings aufgrund ihrer in sich verdrehten Bauweise, auf gerade Abspannungen ohne Umlenkpunkte beschränkt. Aus Spannlitzen, Spanndrähten oder Spannstäben bestehende Spannglieder hingegen, welche parallellaufend auch zu einem Bündel angeordnet sein können, sind hingegen für einen geradlinigen und polygonalen Einsatz geeignet. Aufgrund ihrer hohen Belastungen stellen Spannglieder aus Stahl besondere Anforderungen an die verwendete Stahlqualität und haben im Allgemeinen eine deutlich höhere Zugfestigkeit als Stähle für den Stahlbetonbau. Die Zugfestigkeiten liegen dabei nicht selten bei ca. 1860 N/mm^2 [10]. Wichtig sind aber auch eine hohe Streckgrenze und eine hohe Duktilität für ausreichende Kraftreserven. Die genauen Kennwerte sind den entsprechenden Zulassungen oder Lieferdokumenten, wie z.B. dem Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach DIN EN 10204 zu entnehmen.

Ein weiterer wichtiger Punkt, welcher eher indirekt zu den Grundelementen gehört ist der *Korrosionsschutz*. Er unterteilt sich in den sekundären (Einfettung der Spannglieder) und den primären (Hüllrohre z.B. aus Kunststoff) Korrosionsschutz. Diese Hüllrohre sollen dabei die Reibungskorrosion an den Kontaktstellen dauerhaft verhindern und sind notwendig, da aufgrund der hohen Zugbeanspruchungen eine erhöhte Gefahr der Korrosion besteht.

Das dritte Grundelement stellen die *Verankerungen* dar. Es gibt hierbei zwei verschiedene Ausführungen, die in der Konstruktion mindestens je einmal eingesetzt werden müssen, eine feste Verankerung und einen spannbaren Verankerungspunkt. Sie sind von großer Bedeutung für die Tragwerkkonstruktion, da die Kräfte aus dem Verankerungselement in die Konstruktion geleitet werden und bestehen meistens aus hochfestem Stahl, zu Formteilen bearbeitet, um eine optimale Krafteinleitung und Widerstandskraft zu gewährleisten. Die Spannglieder können auf unterschiedliche Weise an den Verankerungen gehalten werden. Die einfachste Verankerungsart, durch Gewinde und Keile, ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

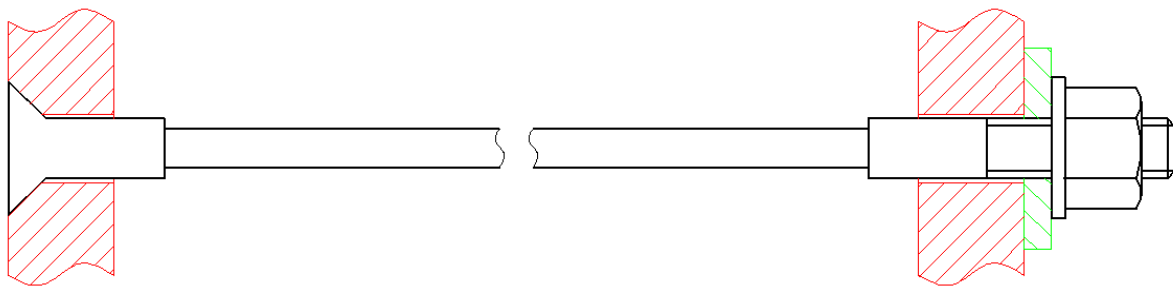


Abbildung 3.3 Verankerungselemente

Ist kein geradliniger Verlauf der Spannglieder möglich so ist der Einsatz von *Umlenkpunkten* unabdingbar. Da wie bereits erwähnt, diese auch Kräfte in die Tragwerkkonstruktion einleiten, müssen diese ähnlich den Verankerungspunkten aus hochfestem Stahl bestehen und eine ähnliche Widerstandskraft aufweisen können. Umlenkstellen ähneln in ihrer Bauform einem Kantenschutz und dienen darüberhinaus der Spanngliedführung. Aufgrund der auftretenden Kräfte ist auf die Einhaltung des Radius im Rundungsbereich zu achten um eine Knickbildung oder Beschädigung der Spannglieder zu verhindern.

Wenn aus verschiedenen Gründen die übliche Lieferlänge der Spannglieder nicht ausreicht, so können diese durch *Kopplungsstücke* und zusätzliche *Führungsstellen* verlängert und ergänzt werden. Führungsstellen kommen zwischen Verankerungs- und/oder Umlenkstellen zum Einsatz und leiten keine Kräfte ins System. Aus diesem Grund sind an deren Herstellung keine speziellen Vorgaben gebunden.

Kopplungsstücke hingegen dienen der direkten Kraftübertragung und unterliegen einer erhöhten Beanspruchung, leiten aber auch keine Kräfte in das Gesamtsystem. Die konstruktive Ausführung variiert zwischen den verschiedenen Herstellern.

3.3.2 Beschreibung des Spannvorgangs

Spannverfahren für Spannglieder ohne Verbund bzw. für externe Vorspannungen gibt es bezogen auf die Spanngliederform einige und daher wird der Spannvorgang hier verallgemeinert erläutert.

Die entweder in Hohlräumen oder außerhalb der Profile verlaufenden Spannglieder werden mit Hilfe von hydraulischen Pressen, in der Regel in drei Arbeitsgängen, gespannt. Dabei wird im ersten Arbeitsgang ca. ein Drittel, im zweiten Arbeitsgang ein weiteres Drittel und im letzten Arbeitsgang der restliche Teil der Gesamtvorspannkraft aufgebracht und mit Hilfe von Manometern genau abgelesen. Nach dem Spannvorgang werden die Spanngliederenden durch spezielle Verankerungselemente von der Spannpresse auf das Verankerungselement abgesetzt [6] und justiert. Der Spannvorgang kann einseitig oder an zwei Seiten durchgeführt werden, was, abhängig vom Gleitverhalten der Spannglieder im Bereich der Umlenkpunkte, bei einem polygonalen Spanngliedverlauf Auswirkungen auf den Spannkraftverlauf hat. Sollten mehrere, parallel wirkende, Spannglieder gleichzeitig zum Einsatz kommen, so kann das Spannen einzeln erfolgen, aber ähnlich der Flanschverschraubungen durch HV-Verbindungen ist die Vorspannkraft vor Abschluss der Arbeiten an jedem Spannglied zu überprüfen und wenn nötig nachzuziehen. Es empfiehlt sich daher mehrere Spannglieder gleichzeitig zu verspannen, da dies weniger Einfluss auf die einzelnen Spannkräfte hat. Nach Abschluss aller Arbeiten ist der Spannvorgang, welcher unter dauerhafter Kontrolle zu erfolgen hat, in Protokollform zu dokumentieren.

3.3.3 Spannverfahren „SUSPA-Draht EX“ [10]

Dieses Spannverfahren kann zur externen Vorspannung ohne Verbund verwendet werden, bei denen die Spannglieder außerhalb des Beton- bzw. Stahlquerschnitts, aber innerhalb der Tragkonstruktion liegen.

Die Spannglieder werden aus 30 bis 66 kaltgezogenen Spannstahldrähten (\varnothing 7mm) aus Stahl (St1470/1670) mit sehr niedriger Relaxation, den Ankerteilen, bestehend aus den Ankerhüllen mit Spreizring, den Grundkörpern, den Kopfhalterscheiben und dem Hüllrohr gefertigt. Die Krafteinleitung vom Draht in den Grundkörper erfolgt durch aufgestauchte Köpfchen.

Die Spannglieder werden als vollverschlossene, dauerhaft vor Korrosion geschützte Fertigspannglieder in einem Spanngliedwerk hergestellt und je nach Länge zum Transport auf Trommeln aufgerollt.

Zum Vorspannen wird die in die Zughülse des Spannankers eingeschraubte Spannspindel benutzt, an der die Spannpresse (Hohlkolbenzylinder) angreift. Zum Abschluss des Vorspannens wird das Spannglied mit einer Stützmutter bei der vorgegebenen Spannkraft festgesetzt. Ein Spannglied kann jederzeit durch Ansetzen einer Spannpresse entspannt, ausgebaut und anschließend durch ein neues ausgetauscht werden.

3.4 Berücksichtigung der Vorspannung in der Bemessung von Tragwerken

Als Abschluss der einleitenden Kapitel wird nun auf die Berechnungsgrundlagen für vorgespannte Tragwerke aus Stahl bzw. auf deren Berechnung eingegangen.

Da das Vorspannen von Tragwerken aus Stahl noch nicht weit verbreitet ist, sind auch noch nicht viele Werke in der Literatur vorhanden, die sich ausführlich mit diesem Thema befassen. Will man die Vorspannung und deren Einwirkungen auf die Berechnung berücksichtigen so orientiert man sich an der DIN 1045 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton“. Dies bildet die Grundlage zur Ansetzung der, aus Umlenkung, Verankerung und Spanngliedern, entstehenden Kräfte. Da diese Elemente völlig unterschiedlich auf das Tragwerk wirken, werden diese während der Berechnung getrennt voneinander betrachtet .

Ähnlich dem Stahl- bzw. Spannbeton betrachtet man vorgespannte Konstruktionen aus Stahl als Verbundelement aus artgleichen Werkstoffen.

In einem Beispieltragwerk mit polygonalem Spanngliedverlauf (siehe Abb. 3.1.2) ergeben sich aus einer eingeleiteten Vorspannung (siehe Abb. 3.4) die Vorspannkräfte V und die, aus der Umlenkung, resultierenden Kräfte R .

Diese Kräfte lassen sich mit Hilfe von Winkelfunktionen in horizontal (x -Richtung) und vertikal (y -Richtung) wirkende Komponenten zerlegen. Sie wirken als innere Kräfte in einem Kräftegleichgewicht und erzeugen keine zusätzlichen Kräfte nach außen, d.h. sie haben zum Beispiel keine Auswirkungen auf die Auflagerkräfte.

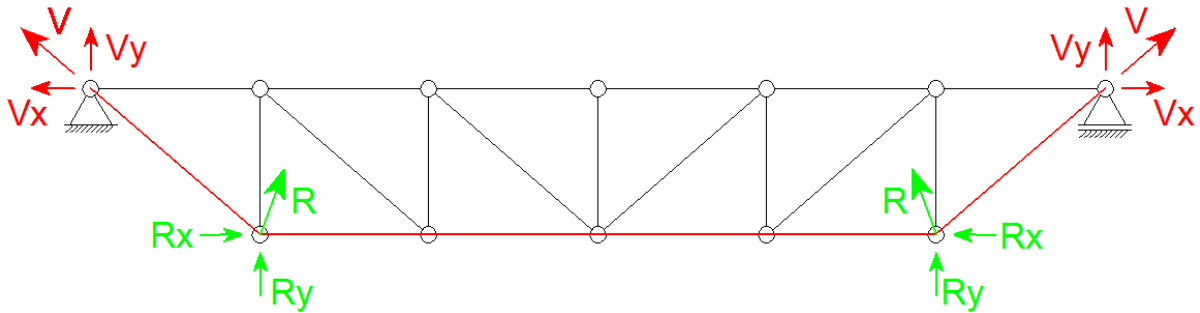


Abbildung 3.4 Kräfte in einem Tragwerk mit polygonalem Spanngliedverlauf

Die in Abbildung 3.4 dargestellten Kräfte, an den Punkten der Umlenkung, resultieren somit aus der Spannkraft in den Spanngliedern. Die Spannkraft in den einzelnen Spanngliedern darf die maximal zulässige Spannkraft (den jeweiligen Zulassungen zu entnehmen) dabei zu keinem Zeitpunkt des Spannvorgangs überschreiten.

Die Berechnungen und Nachweise, zu Vergleichszwecken der Tragwerke, erfolgen nach DIN 18800 unter Berücksichtigung frei gewählter Einwirkungen und Lastkombinationen nach DIN 1055. Die aufgebrachte Vorspannkraft wird dabei als ständig wirkende Kraft eingestuft. Es gelten die gleichen Nachweise wie für normale Tragwerke, es ändern sich lediglich ein paar Schritte bei der Vorgehensweise. Bei der Spanngliedberechnung geht man von einem geradlinigen Verlauf mit einem konstanten Kraftverlauf zwischen den jeweiligen Umlenk- und Verankerungspunkten aus und geht dabei nach DIN 1045-1 Abschnitt 7.7 und den Berechnungshinweisen in [7] & [8] vor. Betrachtet man die Spanngliedkraft etwas genauer, so fällt auf, dass sich die aufgebrachte Vorspannkraft V in der Einbaulage und durch, aus der Belastung der Tragwerkstruktur resultierende, Verformungen noch etwas erhöht. Die Summe aus dieser zusätzlichen Kraft, nachfolgend ΔV genannt, und die bereits aufgebrachte Vorspannkraft V darf die bereits erwähnten maximal zulässigen Spannkraften der Spannglieder nicht überschreiten.

Beachtet man die zusätzlich wirkenden Kräfte, so muss man auch die auftretenden Kraftverluste in die Berechnung einfließen lassen. Es handelt sich hierbei um Kraftverluste durch Reibung an Umlenkpunkten, Schlupf in den Verankerungspunkten und kurzzeitige Relaxation der Spannstähle [9].

4.0 Variantenuntersuchung

In den Kapiteln 4 und 5 sollen verschiedene, baugleiche vorgespannte und nicht vorgespannte Stabtragwerke hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit miteinander verglichen werden. Dazu werden zuerst einmal die Grundlagen für die folgenden Vergleichsrechnungen festgelegt und Tragwerkformen definiert. Nach Bestimmung der wirkenden Randbedingungen und Festlegung der zu untersuchenden Tragwerkformen, erfolgen diverse Berechnungen und Nachweise, welche für die Variantenvergleiche in Kapitel 5 unabdingbar sind.

4.1 Randbedingungen und Einwirkungen

Zur Bestimmung der Beispieltragwerke ist es notwendig die Randbedingungen näher zu definieren. Da diese Diplomarbeit an kein spezielles Bauvorhaben gekoppelt ist, sind die geltenden Randbedingungen und Einwirkungen im Prinzip frei wählbar. Für das Stabtragwerk, in Form eines Fachwerkträgers z.B. für Brückenkonstruktionen, wird eine Stützweite von 60m gewählt. Bezüglich der Wirtschaftlichkeit soll für das Verhältnis zwischen Länge und Höhe die Faustregel $l/8$ bis $l/12$ gelten, daraus resultiert eine Tragwerkhöhe von 6m. Die detaillierten Darstellungen der gewählten Fachwerkformen werden später genauer abgebildet. Das Tragwerk wird auf der Stützweite von 60m in 10 Felder, getrennt von vertikalen Stützen, á 6m aufgeteilt. Durch die Tragwerkhöhe von 6m ergibt sich somit die Lage der Diagonalstreben im Winkel von 45° zu den Ober- bzw. Untergurten.

Der Lastabtrag in den Auflagern erfolgt, wie bei einer stützenfreien Konstruktion, durch ein gelenkiges Festlager mit 2 Freiheitsgraden in der Ebene und einem gelenkigen Loslager mit 3 Freiheitsgraden in der Ebene. Daraus entstehen keine Einspannmomente für die Tragwerkkonstruktion die das Tragverhalten und damit die Wirkung der Vorspannung beeinflussen.

In der Praxis wirkt ein Stabtragwerk immer im dreidimensionalen Raum und durch diverse Verbände und Streben auch auf die Gesamtkonstruktion. Während der Berechnungen wird eine Lagerung der einzelnen Knotenpunkte simuliert und das Stabtragwerk ausschließlich in der Ebene betrachtet. Des weiteren wird angenommen, dass Ober- und Untergurte (in der Abbildung 4.1 dargestellt, Verband angedeutet) durch einen zusätzlichen Verband gehalten werden. Dieser Verband

kann z.B. als K-Verband mit einer Feldlänge von 3m und eine Feldbreite gemäß der z.B. Fahrbahnbreite ausgeführt werden und soll ein Verformen und Verdrehen einschränken. Dieser Effekt einer räumlichen Aussteifung lässt sich z.B. auch mit Dachpfetten erzielen wenn es sich bei einem Stabtragwerk nicht um eine Brücken- sondern eher um eine Dachkonstruktion handelt. Das heißt es werden ausschließlich die vertikal und horizontal wirkenden Kräfte betrachtet und alle quer zu Tragwerkebene wirkenden Kräfte werden vernachlässigt, da diese für die Untersuchungen zu den vorgespannten Tragwerken weniger von Bedeutung sind. Davon ausgeschlossen sind natürlich Verformungen die aus der Fachwerkebene heraustreten infolge z.B. der Biegedrillknickung.

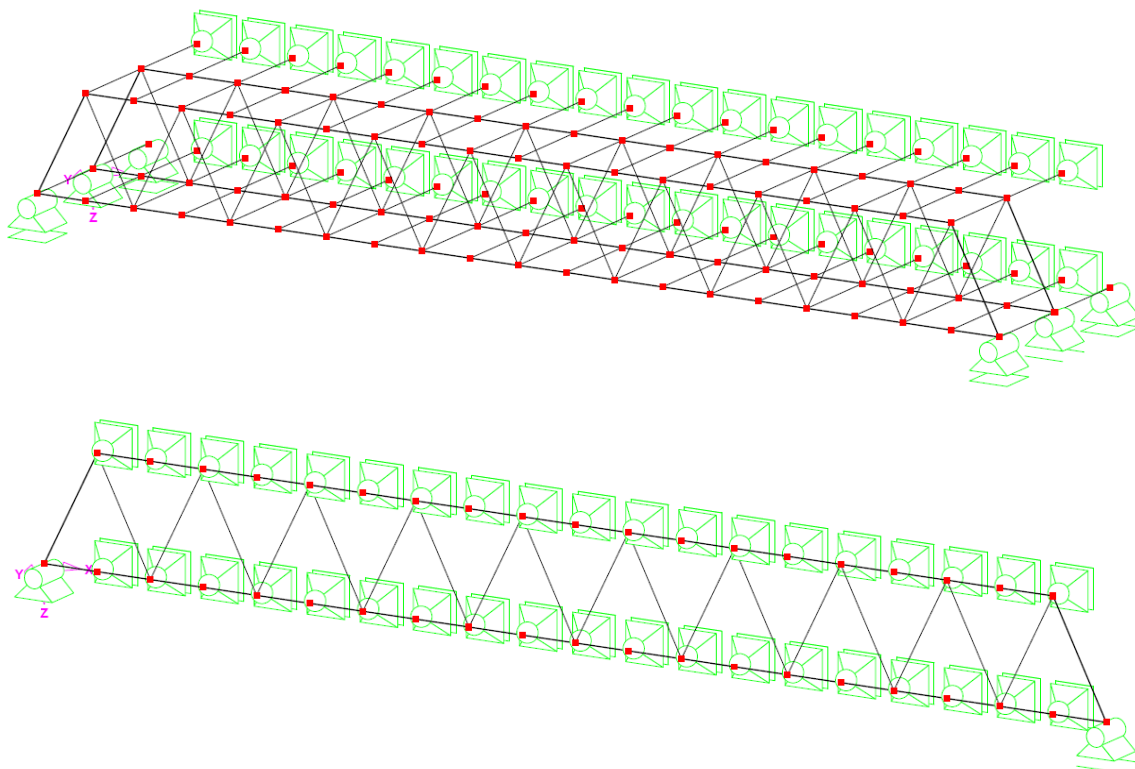


Abbildung 4.1 Darstellung der Verlagerungen einer möglichen Stabtragwerkvariante (räumlich & eben)

In Abb. 4.1 ist zu erkennen, dass eine dreidimensionale Lagerung erfolgt, die Kräfte in y-Richtung aber durch in horizontale und vertikale Richtung frei bewegliche Verlagerungen abgefangen werden. Die Stabilitätsnachweise werden dagegen in einem dreidimensionalen System betrachtet, da ein Ausknicken der einzelnen Stäbe auch aus der Tragwerkebene heraus möglich ist.

Die vertikalen Einwirkungen, auf die Tragwerkkonstruktion, entsprechen den im Kapitel 2.2 genannten Belastungen, werden aber durch fiktive Werte ersetzt und als Punktlasten im Bereich der Knotenpunkte in das Tragwerk eingeleitet. Für die

Knotenpunkte im Obergurt bedeutet dies eine Belastung von 200kN, unabhängig von ständiger oder veränderlicher Einwirkung und für die Knoten in den Randbereichen 50% der Belastung. Hierbei handelt es nicht um die charakteristischen Werte sondern um Bemessungslasten die sich aus den diversen Lastfaktoren wie z.B. 0,9; 1,1; 1,35 & 1,5 ergeben.

Am, in der Abb. 4.1 dargestellten, beispielhaften Tragwerk würde das für den Untergurt bedeuten, dass in die Knoten aus 4 Stäben jeweils 200kN und in die Auflagerpunkte jeweils 100kN eingeleitet werden. Die Lastabtragungen und somit das Tragverhalten der Tragkonstruktion, sowie die Wirkung der Vorspannung wird mittels der statischen Berechnungssoftware RSTAB von der Firma Dlubal untersucht.

4.2 Darstellung ausgewählter Tragwerkformen

Als Fortsetzung zu den in Kap. 4.1 festgelegten Randbedingungen werden nun mögliche Tragstrukturen dargestellt. Unter Beachtung der gewählten Abmessungen lassen sich diverse Strukturen generieren, einige wenige und ein möglicher Spanngliedverlauf sollen in diesem Kapitel erwähnt werden.

Als Grundform wird der in Kap. 2.2 bereits erwähnte Parallelträger gewählt, aber abgesehen von den fast unbegrenzt möglichen Profilquerschnitten gibt es bestimmte Bedingungen bzw. Gestaltungsgrundsätze auf die alle Stabtragwerke zurückgreifen. Für die Lage der Gurte gibt es z.B. nur begrenzte Möglichkeiten. Es kann sich sowohl der Ober- als auch der Untergurt in Höhe der Lager befinden. Des weiteren können Auflagerpunkte auf unterschiedlichen Höhenniveaus sein oder sich beide Gurte ober- bzw. unterhalb der Lagerungen befinden.

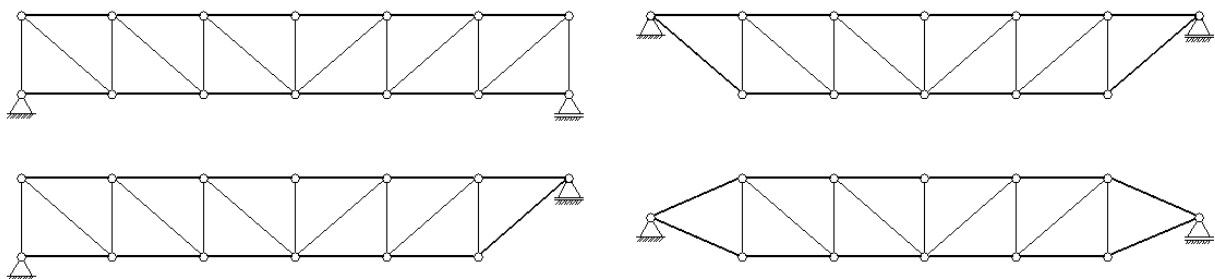


Abbildung 4.2.1 Lage von Ober- und Untergurten bei Parallelträgern

Neben den verschiedenen Lagen der Gurte können auch die Positionen der Stützen und Streben variieren. Die Position der Stützen ist unter anderem abhängig von der Grundform der Tragwerkkonstruktion. Man versucht allerdings immer eine gleichmäßige bzw. symmetrische Aufteilung in Felder zu erreichen mit einem sinnvollem Verhältnis zwischen Höhe und Breite, da dies direkten Einfluss auf den Neigungswinkel der Diagonalstreben und somit deren Kräfte hat.

Dieser Neigungswinkel kann „fallend“ (siehe Abb. 4.2.2 oben links) oder „steigend“ (siehe Abb. 4.2.2 unten links) sein und hat Einfluss auf die Einstufung der Streben in Zug- und Druckstäbe. Konstruktiv möglich, aber umfangreicher in der Realisierung ist die gekreuzte Anordnung von Streben in einem Feld (siehe Abb. 4.2.2 unten rechts). Die sinnvollste Anordnung der Diagonalstreben ist immer von der Belastung und Grundform der Tragstruktur abhängig.

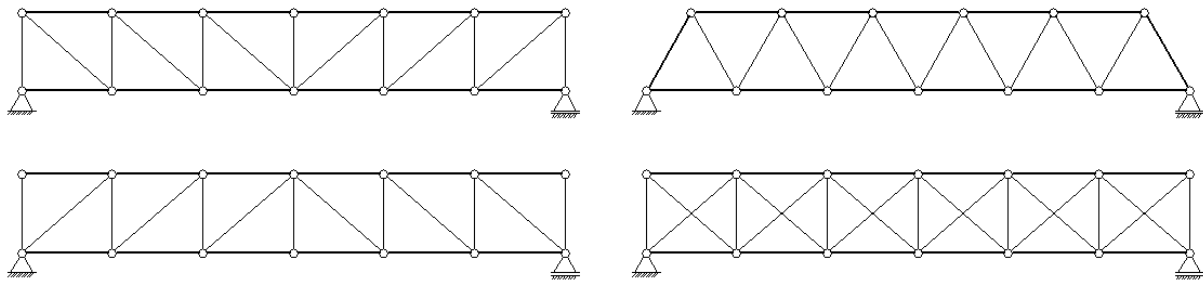


Abbildung 4.2.2 Lage von Diagonalstreben bei Parallelträgern

In den nachfolgenden Abbildungen 4.2.3 und 4.2.4 sind einige Parallelträger, sowie ein möglicher Verlauf der Spannelemente (rot eingefärbt), in verschiedenen Ausführungen dargestellt. Hieraus werden dann verschiedene Tragwerke zu Vergleichsrechnungen ausgewählt.

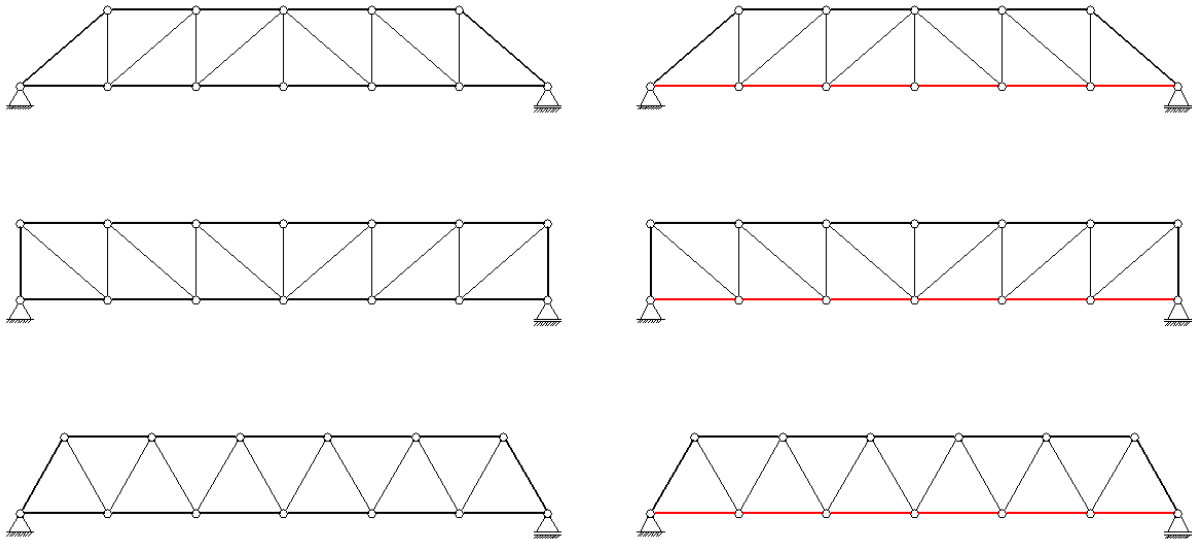


Abbildung 4.2.3 Tragwerkstrukturen und ein Spanngliedverlauf innerhalb der Lagerebene

Da Spannglieder nur an Zugstäben sinnvoll einsetzbar sind und Stabtragwerke in ihrer Höhe über den Auflagerpunkten oft begrenzt sind, können sich selbstverständlich auch andere Strukturen ergeben.

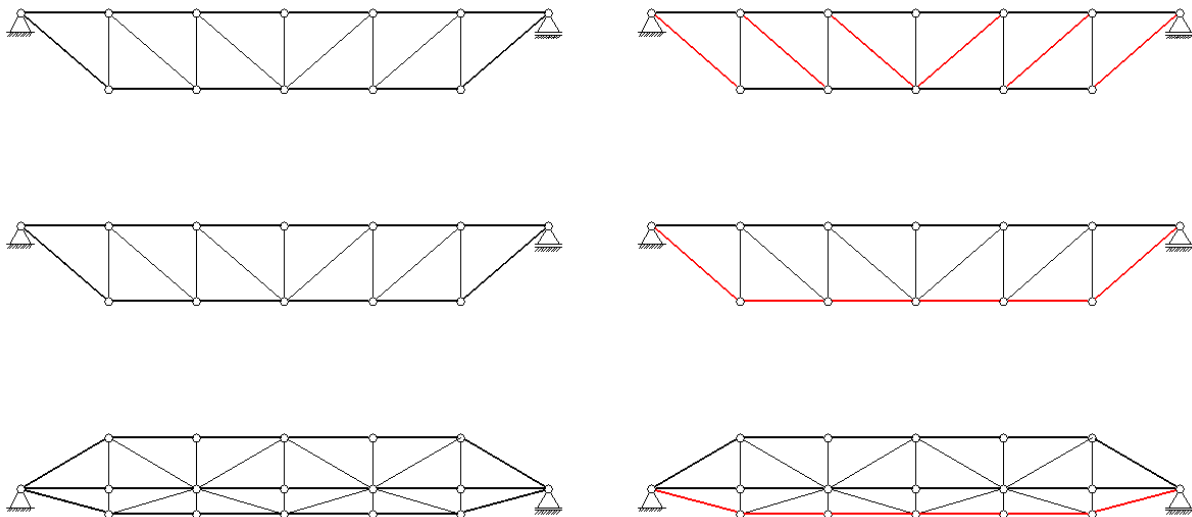


Abbildung 4.2.4 Tragwerkstrukturen und ein Spanngliedverlauf außerhalb der Lagerebene

Nach Klärung der Randbedingungen kann nun eine konkrete Dimensionierung der zu untersuchenden Beispieltragwerke erfolgen. In den beiden folgenden Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 werden verschiedene Varianten von nicht vorgespannten und vorgespannten Stabtragwerken, bei gleicher Grundform, untersucht und anschließend hinsichtlich verschiedener Kriterien miteinander verglichen.

Die Auswahl der Querschnitte erfolgt dabei unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und einem guten Verhältnis zwischen Materialeinsatz und Auslastung der jeweiligen Stäbe. Die Auslastung aller Zug- bzw. Druckstäbe sollte dabei, durch Anpassung der Querschnitte, unter Belastung ähnlich groß sein. Als Faustregel gilt außerdem, Zugstäbe lang und Druckstäbe kurz zu halten.

4.2.1 Nicht vorgespannte Stabtragwerke

Nach dem im vorangegangenen Kapitel 4.2 bereits mögliche Stabtragwerke in Form von Fachwerkträgern dargestellt worden sind, werden nun bestimmte Konstruktionen ausgewählt und mit den in Kapitel 4.1 gewählten Randbedingungen näher untersucht. Für die Berechnungen werden die Belastungen dabei mittig in die Knotenpunkte eingeleitet und mit Hilfe der Statik-Berechnungssoftware RSTAB von Dlubal die resultierenden Schnittgrößen ermittelt. Eine Beurteilung erfolgt dann anhand der Schnittgrößen in ausgewählten Tragwerkstäben.

4.2.1.1 Variante 1 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Die Variante 1 (siehe Abb. 4.2.1.1.1) der nicht vorgespannten Stabtragwerke entspricht z.B. einem Brückenträger in Fachwerkform mit parallel verlaufenden Gurten ohne vertikale Stäbe. Der Untergurt (durchgehend konstant) verläuft in Höhe der Auflagerpunkte und kann z.B. eine Fahrbahn simulieren, so dass in seine Knotenpunkte auch die Versuchskräfte eingeleitet werden.

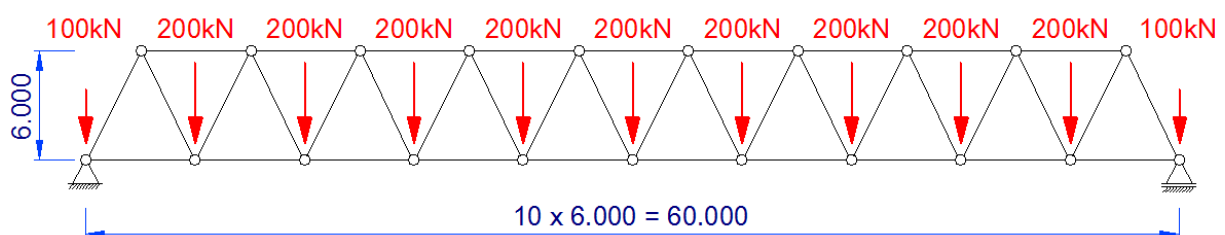


Abbildung 4.2.1.1.1 Variante 1 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Das generierte Modell, sowie eine Nummerierung der Knotenpunkte und Stäbe ist in Abbildung 4.2.1.1.2 dargestellt. Die Stäbe 1-21 stellen dabei den Unter- bzw. Obergurt dar und haben als Querschnitt einen HEA-400 aus S235.

Die Füllstäbe 22-39 wurden entsprechend ihrer zu erwartenden Beanspruchung, auf Zug oder Druck, als Quadratrohr und unabhängig zueinander wie folgt dimensioniert:

Stab 22 & 39: QR 140x10	Stab 25 & 36: QR 160x10	Stab 28 & 33: QR 120x4
Stab 23 & 38: QR 180x10	Stab 26 & 35: QR 120x8	Stab 29 & 32: QR 120x5
Stab 24 & 37: QR 140x8	Stab 27 & 34: QR 150x8	Stab 30 & 31: QR 100x3,6

Von außen nach innen wurde dabei auf paarweise Dimensionierung geachtet.

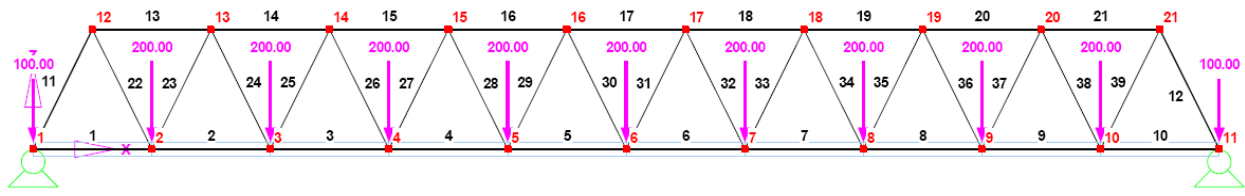


Abbildung 4.2.1.1.2 Variante 1 – generierte Stabstruktur

Die mit Hilfe von RSTAB ermittelten Schnittgrößen (siehe Abb. 4.2.1.1.3) und Auflagerkräfte sowie die Durchbiegung (siehe Abb. 4.2.1.1.4) dienen im späteren Verlauf der Nachweisführung dieser Stabtragwerkvariante.

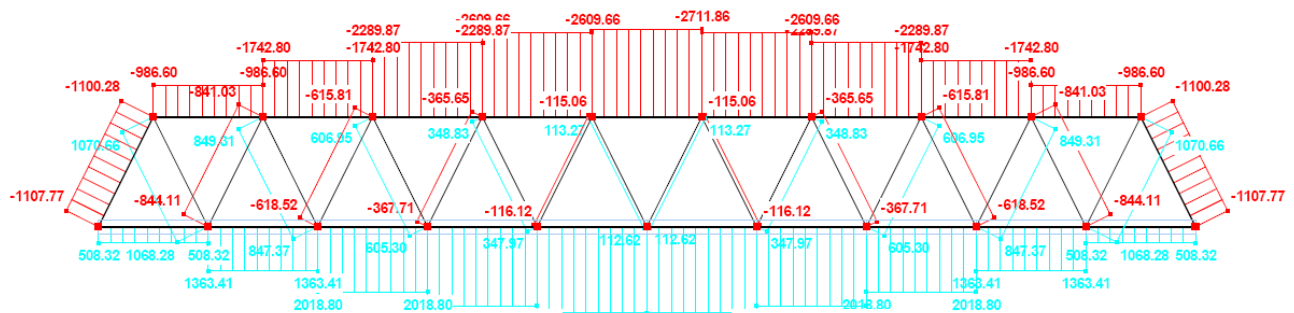


Abbildung 4.2.1.1.3 Variante 1 – Schnittgrößen (Normalkräfte)

Trotz der unterschiedlichen Normalkräfte und Stabquerschnitte erfolgt eine Vergleichsrechnung nur an ausgewählten Stäben, welche später ausgewählt bzw. bestimmt werden.

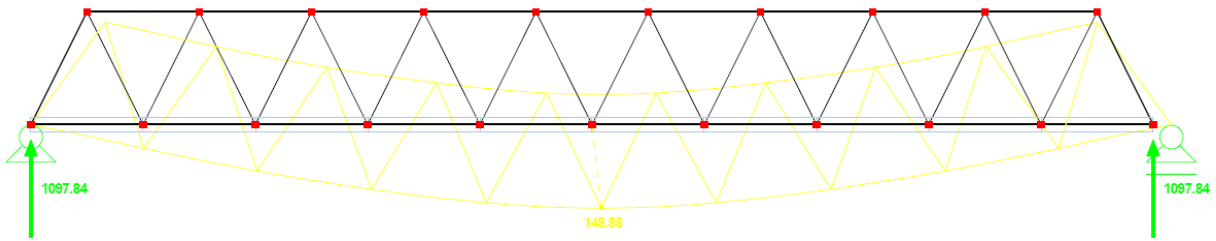


Abbildung 4.2.1.1.4 Variante 1 – Auflagerkräfte und Durchbiegung

Nicht unwichtig für den Einsatz von Spanngliedern ist auch eine nach außen gerichtete Verschiebung des Loslagers um 32,4mm an der ersten Variante für ein nicht vorgespanntes Stabtragwerk.

4.2.1.2 Variante 2 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Bei der zweiten Variante (siehe Abb. 4.2.1.2.1) handelt es sich ebenfalls um ein Stabtragwerk in Form eines Fachwerkträgers. Die belasteten Knoten liegen dabei wieder in Höhe der Auflagerpunkte, gehören aber diesmal zum Obergurt des Fachwerkträgers. Ein weiterer Unterschied zur Variante 1 ist die Verwendung von vertikalen Stützen (Druckbeanspruchung) und Diagonalstreben, die ausschließlich auf Zug beansprucht werden.

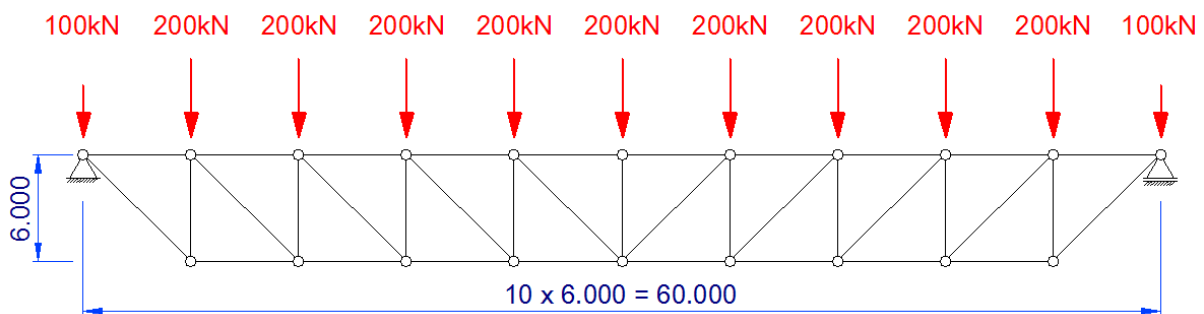


Abbildung 4.2.1.2.1 Variante 2 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Der Querschnitt (HEA-400) der parallel zu einander verlaufenden Ober- und Untergurte (Stäbe 1-20) ist über die Gesamte Stützweite von 60m konstant und die vertikalen bzw. diagonalen Füllstäbe (Stäbe 21-37) wurden entsprechend ihrer Belastungsart auf Zug oder Druck dimensioniert. Die erneut aus Quadratrohr

bestehenden Füllstäbe des Stabtragwerkes (siehe Abb. 4.2.1.2.2) wurden dabei wie folgt verteilt:

Stab 21 & 37: QR 200x8	Stab 27 & 31: QR 140x5	Stab 24 & 34: QR 110x10
Stab 23 & 35: QR 180x8	Stab 29: QR 120x5	Stab 26 & 32: QR 100x5,6
Stab 25 & 33: QR 160x7,1	Stab 22 & 36: QR 120x12,5	Stab 28 & 30: QR 90x4

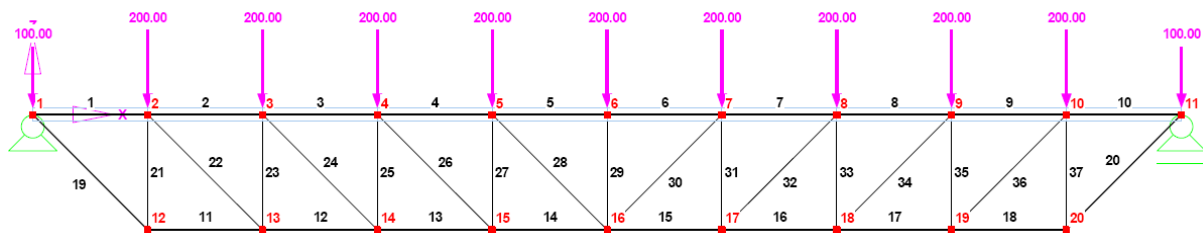


Abbildung 4.2.1.2.2 Variante 2 – generierte Stabstruktur

Die für diese Tragstruktur ermittelten Schnittgrößen sind in Abbildung 4.2.1.2.3 dargestellt und wurden mit der Berechnungssoftware RSTAB ermittelt. Auch an diesem Modell findet eine Vergleichsrechnung nur an ausgewählten Stäben statt.

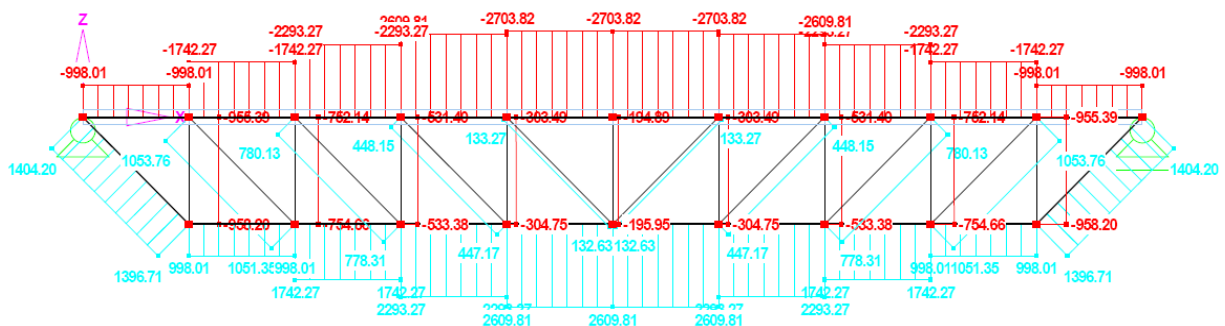


Abbildung 4.2.1.2.3 Variante 2 – Schnittgrößen (Normalkräfte)

In der Abbildung 4.2.1.2.4 ist die vorhandene Durchbiegung, die resultierenden Auflagerkräfte und die Verschiebung des Loslagers nach innen um 37,2mm dargestellt. Die Beeinflussung der Durchbiegung und Verschiebung, durch den Einsatz von auf Zug beanspruchten Spanngliedern, wird in später folgenden Kapiteln zu den vorgespannten Stabtragwerken erläutert.

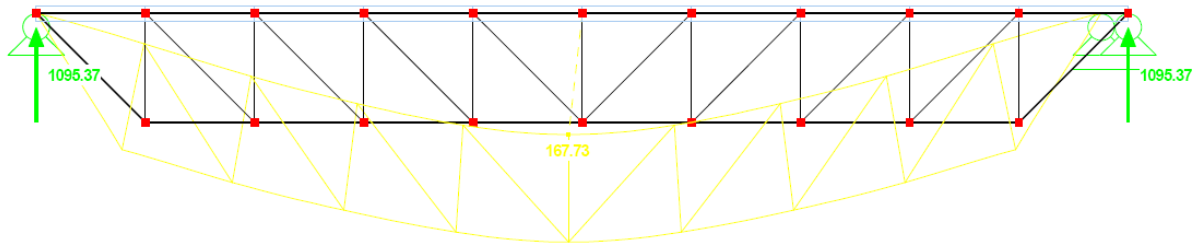


Abbildung 4.2.1.2.4 Variante 2 – Auflagerkräfte und Durchbiegung

4.2.1.3 Variante 3 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Bei der dritten Variante (siehe Abb. 4.2.1.2.1) handelt es sich um eine baugleiche Kopie der Variante 2 welche sich nur durch einen geänderten Verlauf der Spannelemente von dieser unterscheidet. Da auch die Belastungen unverändert übernommen werden, ergeben sich die gleichen Schnittgrößen und Verformungen, so dass auf eine erneute Beschreibung der nicht vorgespannten Variante 3 an dieser Stelle verzichtet werden kann.

4.2.1.4 Variante 4 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Als vierte und letzte Variante wird eine Tragkonstruktion aus Hohlprofilen gewählt, welche in ihrer Tragstruktur den Varianten 2 und 3 (siehe Abb. 4.2.1.2.1) entspricht. Es soll dabei nahezu eine optimale Ausnutzung der Tragfähigkeit für die einzelnen Stäbe erzielt werden, um Aussagen zum Vergleich hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bzw. der Materialersparnis treffen zu können.

Die einzelne Stabverteilung der generierten Tragstruktur (siehe Abb. 4.2.1.2.2) setzt sich dabei wie folgt zusammen:

Stab 1 & 10: Ro 323,9x5,0	Stab 2 & 9: Ro 323,9x8,8	Stab 3 & 8: Ro 355,6x11
Stab 4 & 7: Ro 355,6x12,5	Stab 5 & 6: Ro 355,6x12,5	Stab 11 & 18: Ro 323,9x4,5
Stab 12 & 17: Ro 323,9x8,0	Stab 13 & 16: Ro 323,9x10,0	Stab 14 & 15: Ro 323,9x12,0
Stab 19 & 20: Ro 323,9x6,0	Stab 21 & 37: Ro 323,9x5,0	Stab 22 & 36: Ro 193,7x8,0
Stab 23 & 35: Ro 271,0x5,0	Stab 24 & 34: Ro 139,7x8,0	Stab 25 & 33: Ro 219,1x5,0
Stab 26 & 32: Ro 114,3x6,0	Stab 27 & 31: Ro 168,3x5,0	Stab 28 & 30: Ro 60,3x3,2
Stab 29: Ro 139,7x4,5		

Aus den vorher genannten Querschnitten und den jeweiligen Stablängen ergibt sich eine Masse von $\sim 11.980\text{kg}$ bzw. $\sim 11,98\text{to}$ für die Gesamtkonstruktion, welche unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit im späteren Teil noch eine Rolle spielen wird. Die erneut mit Hilfe einer Berechnungssoftware ermittelten Schnittgrößen sind in der Abbildung 4.2.1.4.1 dargestellt.

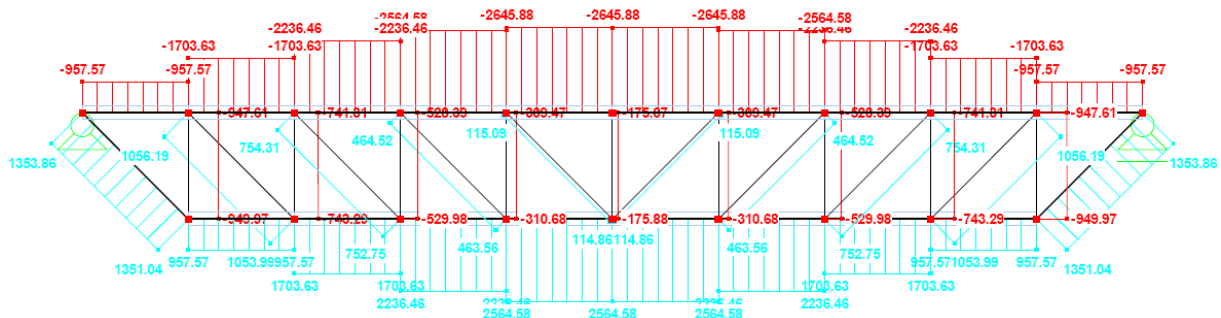


Abbildung 4.2.1.4.1 Variante 4 – Schnittgrößen (Normalkräfte)

Neben den Schnittgrößen sollen auch für Variante 4 die Verformungen inkl. Auflagerreaktionen erfasst und in später folgenden Kapiteln untersucht werden.

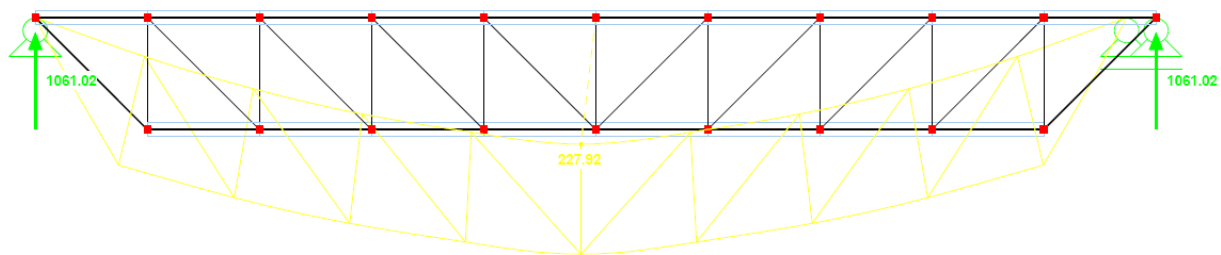


Abbildung 4.2.1.4.2 Variante 4 – Auflagerkräfte und Durchbiegung

4.2.2 Vorgespannte Stabtragwerke

Für die im Kapitel 4.2.1 erwähnten Trakwerksmodelle, als nicht vorgespannte Konstruktion, werden nun dazugehörige Modelle konzipiert und ein Verlauf der Spannglieder sowie die aufzubringende Spannkraft erläutert.

Dafür gelten selbstverständlich die gleichen Randbedingungen wie in Kapitel 4.2.1. Für die Varianten 1 bis 3 werden auch 1:1 die gleichen Querschnitte verwendet, unabhängig von der Auslastung, um die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen nicht zu verfälschen. Das Vorspannen der Tragwerke erfolgt dabei mit dem in Kapitel 3.3.3 erläuterten Spannverfahren und dem gewählten Spanndraht EX-36 [11].

Eine Verankerung der einzelnen Spannelemente im Tragwerk erfolgt dabei wie in der Abbildung 4.2.2.1 und der Abbildung 4.2.2.2 am Beispiel eines HEA 400 dargestellt.

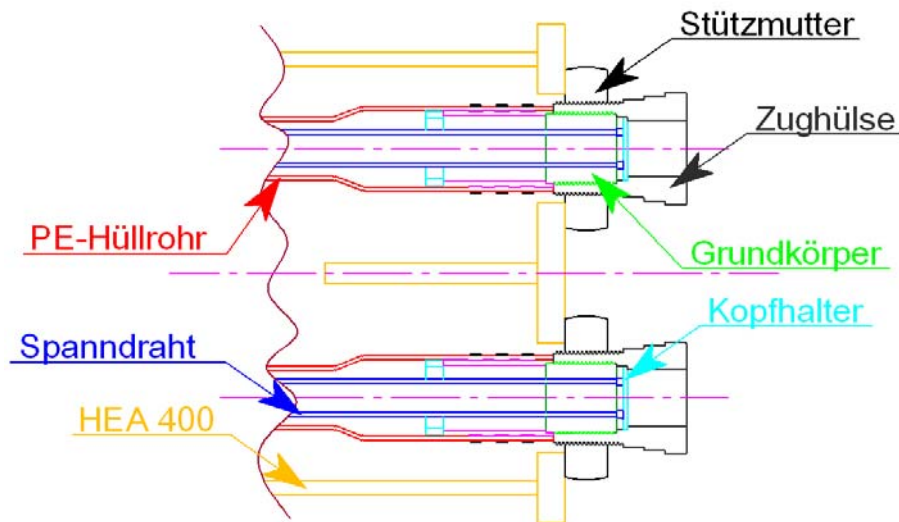


Abbildung 4.2.2.1 Spanndrahtverankerung Spananker

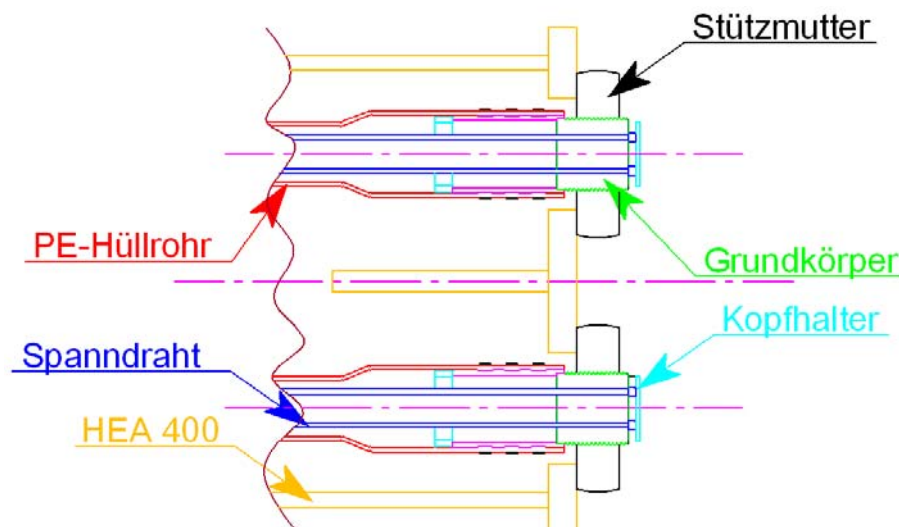


Abbildung 4.2.2.2 Spanndrahtverankerung Festanker

Nach abgeschlossener Vorspannung werden die Spann- bzw. Verankerungspunkte versiegelt oder durch Abdeckkappen verdeckt um einen optimalen Korrosionsschutz gewährleisten zu können.

Für die Berechnung der Anker- bzw. Umlenkkräfte bei den vorgespannten Tragwerken wird der vereinfachte Fall einer konstant wirkenden Vorspannkraft angenommen. In der Realität wirken während dem Spannvorgang, dem Absetzen der Spannpresse und nach längerer Einsatzzeit unterschiedlich große Kräfte die aber

nur geringfügig voneinander abweichen. Bei annähernd maximaler Ausnutzung der Spannelemente ist allerdings besonders zu überprüfen ob die zulässigen Kräfte zu keinem Zeitpunkt überschritten werden.

Des weiteren wird der Einfluss der Reibung, speziell im Bereich der Umlenkstellen (Reibungsbeiwerte sind den jeweiligen Zulassungen zu entnehmen) vernachlässigt, da der resultierende Kraftverlust nur ca. 1% der Vorspannkraft beträgt.

4.2.2.1 Variante 1 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Die als Variante1 (siehe Abb.4.2.1.1.1) generierte Tragwerkstruktur in Fachwerkform wird nun durch unabhängig voneinander wirkende Spannelemente dahingehend „unterstützt“, dass es Auswirkung auf das Tragverhalten haben soll. In welchem Umfang dieser Einfluss stattfindet, positiv und/oder negativ ist wird in den später folgenden Kapiteln noch untersucht.

Es sollen dabei dieselben Ausgangsbedingungen (Belastungen & Dimensionierung) herrschen wie bei der nicht vorgespannten Variante 1 (siehe Kapitel 4.2.1.1).

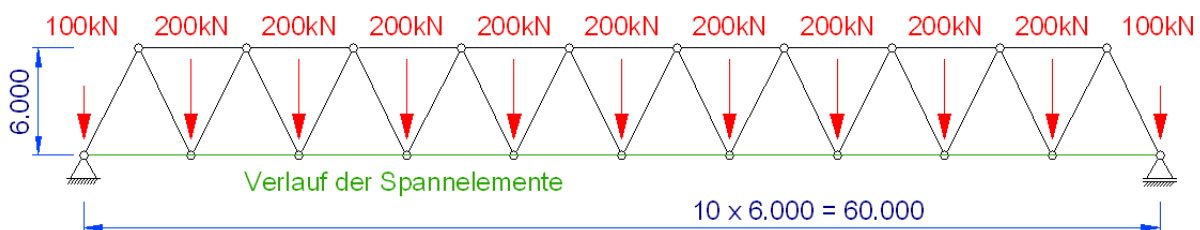


Abbildung 4.2.2.1.1 Variante 1 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Die in Abbildung 4.2.2.1.1 dargestellte Tragstruktur setzt sich aus denselben Querschnitten zusammen, wie bereits die Variante 1 der nicht vorgespannten Tragwerke. Allerdings wird durch die Verwendung von Spannelementen eine zusätzliche (Vorspan-)Kraft, an den Auflagerpunkten, in das Stabtragwerk eingeleitet (siehe Abb. 4.2.2.1.2).

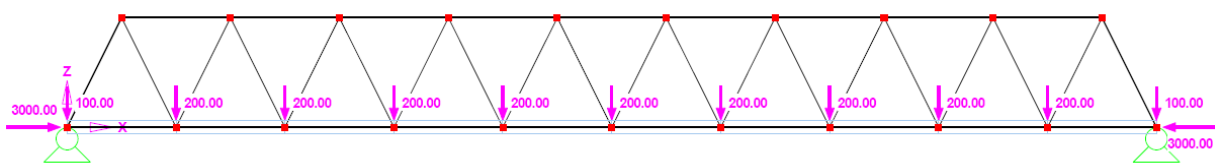


Abbildung 4.2.2.1.2 Variante 1 – generierte Stabstruktur

Diese zusätzlich wirkende Kraft resultiert aus 4 Spannelementen [11] (Draht: EX-36) welche wiederum aus mehreren Drähten ($\varnothing=7\text{mm}$; 36Stück; nicht miteinander verdreht oder verbunden; „frei beweglich“ in Hüllrohren aus Kunststoff) bestehen und am Untergurt verlaufen (siehe Abb. 4.2.2.1.3). Die Spannelemente sind dabei nur an den beiden Auflagern im Tragwerk verankert und lediglich durch Führungselemente, also ohne Krafteinleitung geführt.

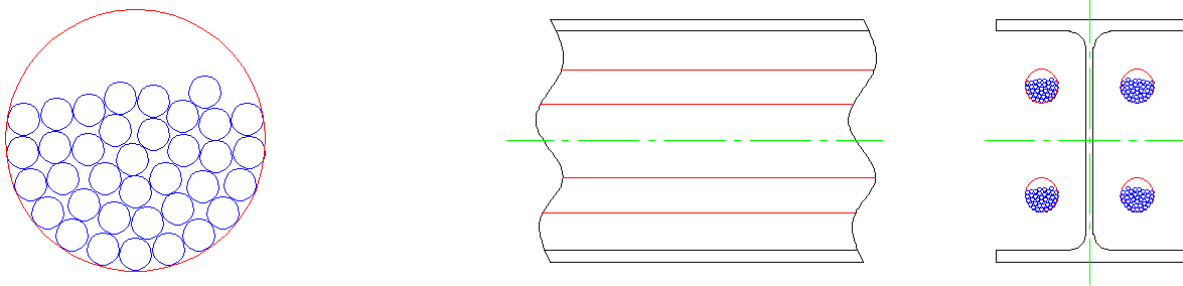


Abbildung 4.2.2.1.3 Spanndraht und Spanndrahtverlauf

Mittels einer Spannpressen wird jedes der 4 Spannelemente unabhängig voneinander mit einer Vorspannkraft von 750kN montiert und fest im Tragwerk verankert (siehe Abbildung 4.2.2.1.3). Die aus diesem Vorgang resultierenden 3000kN wirken im Bereich der Auflagerpunkte, welche allerdings nicht detailliert dargestellt werden. Eine besondere Beachtung der zulässigen Rand- und Achsabstände, wie es bei Verankerungen im Beton vorgeschrieben ist kann hier entfallen. Somit erfolgt eine Begrenzung der Achsabstände nur durch den Platzbedarf der Zughülse (Spannanker) und dem Verankerungskörper (Festanker).

Aufgrund der Länge der Spannglieder werden zusätzliche Führungsstellen angebracht die allerdings keine zusätzlichen Kräfte ins System einleiten sollen. Sie werden als einfache Bleche, z.B. in Form von Aussteifungsrippen, ausgeführt und mit je 2 Bohrungen versehen, welche den Außendurchmesser der Hüllrohre nicht unterschreiten. Zu beachten ist dabei, dass der Durchmesser der Hüllrohre im Bereich der Verankerungsstellen maßgebend ist. Eine weitere wichtige Besonderheit der Führungsstellen ist die Anbringung von Halbschalen, wie sie auch bei Umlenkungen zum Einsatz kommen, aus z.B. Hartkunststoffen. Diese Halbschalen dienen u.a. als Auflagefläche für lange Spannglieder bzw. deren empfindliche Hüllrohre und müssen daher abgerundete Außenkanten und eine dauerhaft gefettete Kontaktfläche aufweisen.

Die resultierenden Schnittgrößen, beschränkt auf die Normalkräfte, für diese vorgespannte Tragwerkkonstruktion sind in Abbildung 4.2.2.1.4 dargestellt und werden für die vergleichenden Rechnungen herangezogen.

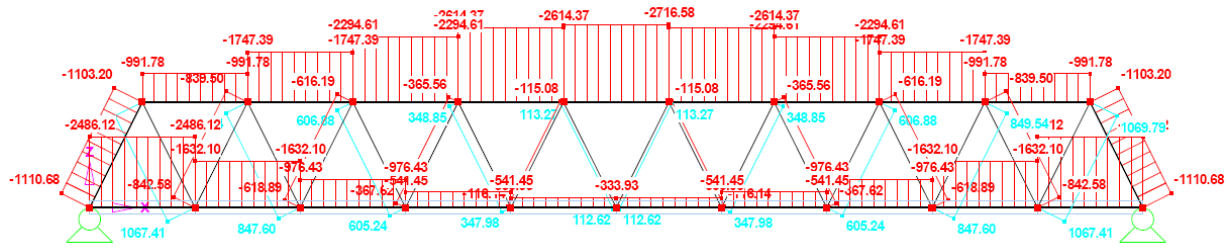


Abbildung 4.2.2.1.4 Variante 1 – Schnittgrößen (Normalkräfte)

Als erster deutlicher Unterschied, im Vergleich zwischen vorgespannter und nicht vorgespannter Variante, ergibt sich eine deutlich geringere Verformung der Gesamtkonstruktion von nur noch ca. 81mm und eine nach innen gerichtete Verschiebung des Loslagers um 21mm (siehe Abbildung 4.2.2.1.5).

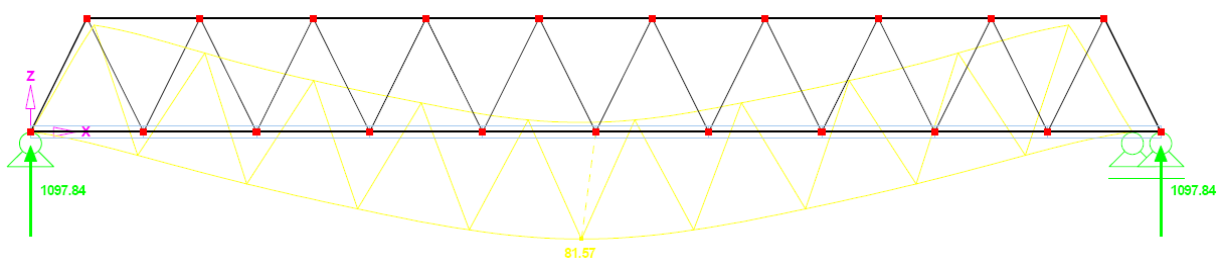


Abbildung 4.2.2.1.5 Variante 1 – Auflagerkräfte und Durchbiegung

Auf die wichtigsten Unterschiede bzw. resultierenden Auswirkungen der jeweiligen Varianten zueinander wird in später folgenden Kapiteln noch genauer eingegangen.

4.2.2.2 Variante 2 – Vorgespanntes Stabtragwerk

In diesem Kapitel wird nun das in Abbildung 4.2.1.2.1 dargestellte Stabtragwerk als vorgespannte Variante näher betrachtet. Durch die zusätzlichen Spannglieder, entlang des Untergurtes (siehe Abb. 4.2.2.2.1), wirken zusätzliche Kräfte auf das Tragwerk. Hierbei darf natürlich neben der Wirkung der Vorspannkräfte (V) auch die gleichzeitige Wirkung der resultierenden Kräfte (R) im Bereich der Umlenkstellen nicht vernachlässigt werden.

Auch für diese Vorspannungsvariante kommen erneut 4 Spannelemente (EX-36) mit je 36 Spanndrähten ($\varnothing = 7\text{mm}$) zum Einsatz die analog zur Variante 1 der vorgespannten Stabtragwerke im Bereich der Auflagerpunkte verankert sind.

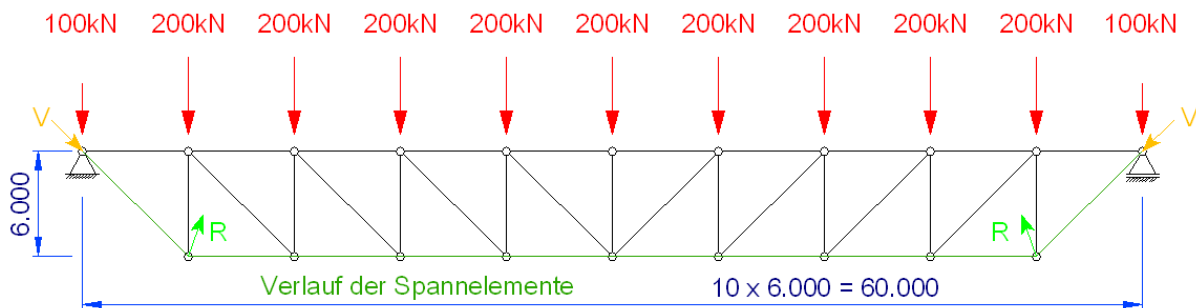


Abbildung 4.2.2.2.1 Variante 2 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Jedes dieser Spannelemente wird unabhängig voneinander mit einer jeweiligen Vorspannkraft von 750 kN montiert, so dass zusätzlich je Verankerung 3000 kN auf die Gesamtkonstruktion wirken. Die somit, mit Hilfe der Berechnungssoftware, generierte Stabstruktur ist in Abbildung 4.2.2.2.2 dargestellt.

Um später aussagefähige Vergleiche durchführen zu können erfolgt eine Verteilung der Querschnitte wie bereits in Kapitel 4.2.1.2 beschrieben. Der für den Ober- und Untergurt (Stäbe 1-20) gewählte Querschnitt (HEA-400) bleibt ebenfalls unverändert.

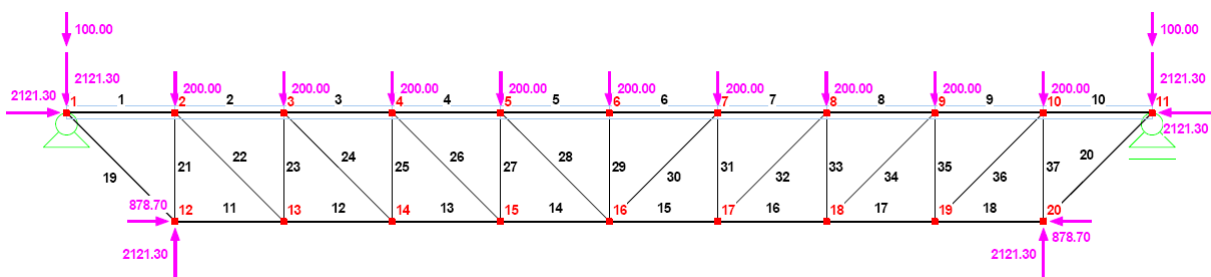


Abbildung 4.2.2.2.2 Variante 2 – generierte Stabstruktur

Es ist dabei wichtig zu beachten, dass die Vorspannkraften dieses Mal nicht horizontal oder vertikal verlaufen sondern exakt in Stabrichtung der Stäbe Nr. 19 & 20. Für die als Beispielrechnung gewählte Tragstruktur bedeutet dies also einen Winkel von 45° . Die 3000 kN wirken dabei als resultierende Kraft aus einer horizontal angreifenden Kraft und einer vertikal angreifenden Kraft in Höhe von je 2121,3 kN.

Wie bereits zuvor erwähnt, resultieren keine zusätzliche Auflagerkräfte aus der Vorspannung. Die nun, hervorgerufen aus der Vorspannung, wirkenden vertikalen Kräfte ($2 \times 2121,3\text{kN}$) müssen also wieder in ein Kräftegleichgewicht gebracht

Anhand der Winkelbeziehungen (45°) ließ sich bereits die angesetzte Vorspannkraft ($V = 3000\text{kN}$) in eine horizontale Kraftkomponente ($V_x = 2121,3\text{kN}$) und eine vertikale Kraftkomponente ($V_z = 2121,3\text{kN}$) aufteilen. Die beiden horizontal wirkenden Kräfte heben sich im Kräftegleichgewicht ($\sum F_{(x)} = 0$) gegenseitig auf, wenn man das Gesamtsystem betrachtet.

The diagram illustrates the internal forces within a bridge deck cross-section. The top view shows the deck's width and various force values (e.g., -1013.42, -1574.08, -1744.55) and a side view showing the internal structure and forces (e.g., 1032.77, 782.26, 447.81).

The diagram shows a truss structure with a central vertical displacement of 103.39 and reaction forces of 1095.37 at both ends. The structure is supported by two green upward-pointing arrows at the left and right ends, each labeled 1095.37. A yellow line indicates the central vertical displacement of 103.39. The truss is composed of black and yellow lines, with red dots at the joints.

Der Abbildung 4.2.2.2.4 kann man bereits entnehmen das eine Vorspannung, zumindest in dieser Dimensionierung, bei der gewählten Tragwerksstruktur keinen großen positiven bzw. negativen Einfluss auf die horizontale Verschiebung des Loslagers hat. In Zahlen ausgedrückt verschiebt sich das Loslager mit 37,3mm theoretisch sogar noch um 0,1mm mehr nach innen.

Der Einfluss von externen Vorspannungen auf den Verschiebeweg des Loslagers sollte allerdings immer bei der Tragwerksplanung berücksichtigt werden.

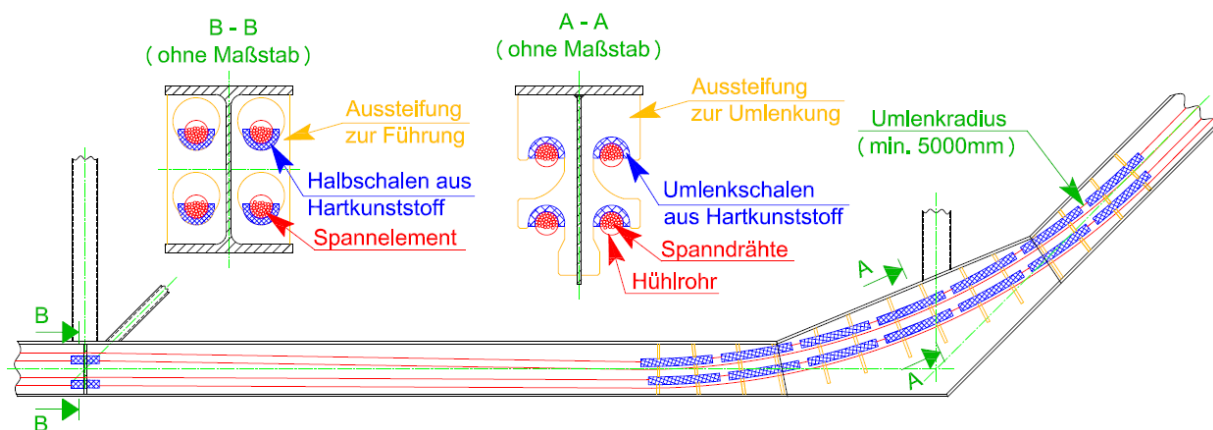


Abbildung 4.2.2.5 Variante 2 – Beispiel für eine Führungs- und eine Umlenkstelle

Vor Abschluss dieses Kapitels muss allerdings noch ein wichtiger Aspekt näher erläutert werden. Dabei handelt es sich um die konstruktive Gestaltung der Umlenkstellen (siehe Abbildung 4.2.2.5), die im Gegensatz zu den Verankerungsstellen (siehe Kapitel 4.2.2) eine größere Anzahl an Einschränkungen für die Ausführung bereithält und ebenfalls Kräfte in das Gesamtsystem einleitet. Hierfür kommen speziell geformte Aussteifungsbleche zum Einsatz, in die die Spannelemente eingefädelt werden und diese unter Einhaltung des vom Hersteller geforderten Mindestradius um den Umlenkpunkt herumführen. Die Spannelemente werden dabei in geformten Halbschalen abgelegt, welche aus hartem Kunststoff bestehen und eine Mindestlänge von $6,0^\circ$ auf dem Umlenkradius von 5000mm haben müssen. Für die gewählte Konstruktion errechnet sich die Länge der Umlenkhalbschalen bei einem Durchmesser von 10000mm somit wie folgt:

der Umfang der Umlenkung beträgt 31416mm und wird mit $6^\circ/360^\circ$ multipliziert was eine Mindestlänge der einzelnen Segmente von 524mm bedeutet. Diese müssen an den Kanten abgerundet sein um eine Beschädigung der Hüllrohre zu verhindern. Des weiteren ist bei der Montage darauf zu achten das die Kontaktflächen zwischen den

Hüllrohren und den Umlenk- bzw. Führungshalbschalen ständig gefettet sind um eine Beeinflussung durch Reibung zu minimieren.

4.2.2.3 Variante 3 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Wie bereits in Kapitel 4.2.1.3 erwähnt unterscheidet sich diese Variante 3 konstruktiv nur geringfügig von der Variante 2. Bei der Darstellung des Spanngliedverlaufs wird allerdings der einzige Unterschied deutlich. Es kommt erneut zu einer Vorspannung entlang des Untergurtes (siehe Abb. 4.2.2.3.1) welche sich allerdings auf den parallel verlaufenden Teil beschränkt. Dies führt zu einem Wegfall der Umlenkstellen und die daraus resultierenden Kräfte. Selbstverständlich kommen auch für diese Variante 4 Spannelemente (EX-36) mit je 36 Spanndrähten ($\varnothing = 7\text{mm}$) zum Einsatz, die aber im Gegensatz zu den vorangegangenen Varianten im Bereich der ehemaligen Umlenkpunkte verankert sind.

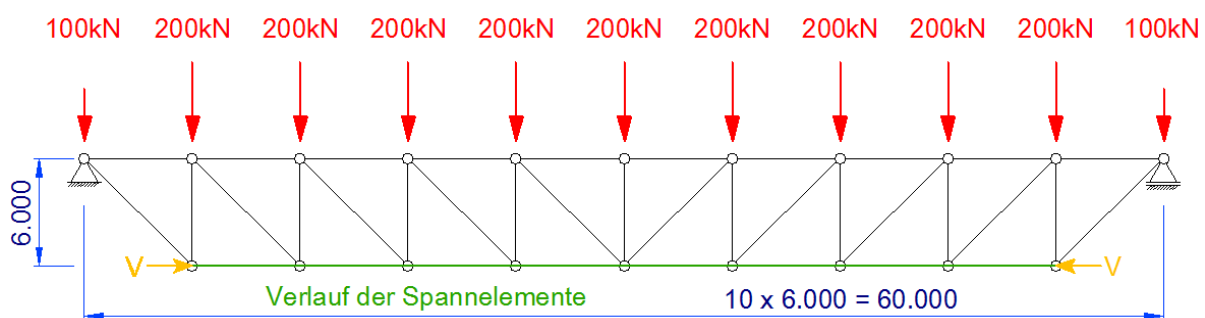


Abbildung 4.2.2.3.1 Variante 3 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Die Spannelemente werden erneut mit einer Vorspannkraft von jeweils 750kN und unabhängig voneinander montiert, so dass zusätzlich 3000kN je ehemalige Umlenkstelle auf die Tragkonstruktion wirken (siehe Abb. 4.2.2.3.2). Die Querschnitte bleiben baugleich zur Variante 2 unverändert.

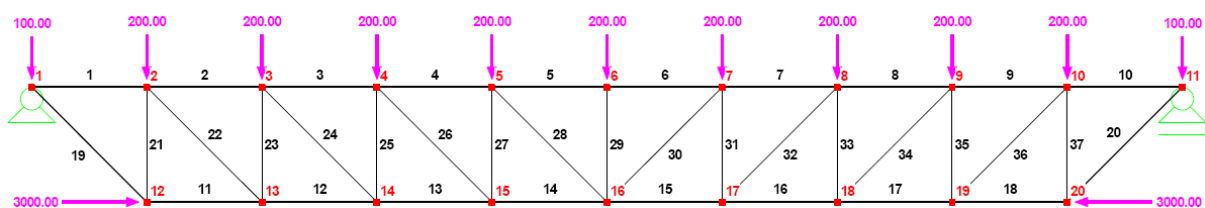


Abbildung 4.2.2.3.2 Variante 3 – generierte Stabstruktur

Die angesetzten Vorspannkräfte wirken dabei horizontal entlang des Untergurtes bzw. in Stabrichtung der Stäbe Nr. 11 & 18. Die somit resultierenden Normalkräfte (siehe Abb. 4.2.2.3.3) für diese generierte Tragstruktur wurden erneut mit Hilfe einer Berechnungssoftware ermittelt.

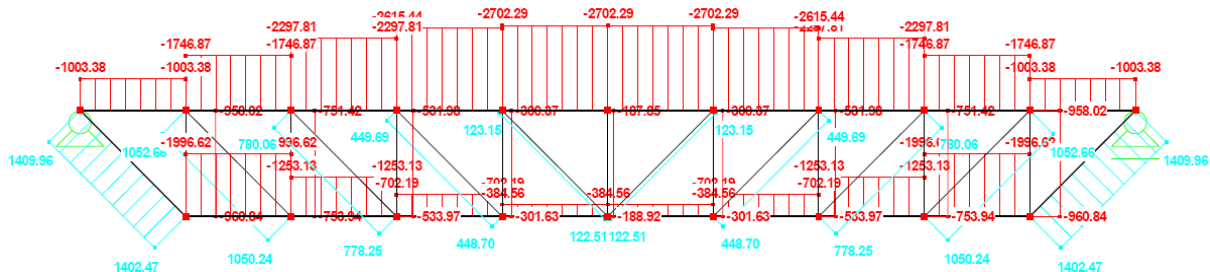


Abbildung 4.2.2.3.3 Variante 3 – Schnittgrößen (Normalkräfte)

Die aus Belastung und Vorspannung resultierenden Auflagerreaktionen sowie die zu erwartende Verformung der Gesamtstruktur sind in der Abbildung 4.2.2.3.4 dargestellt.

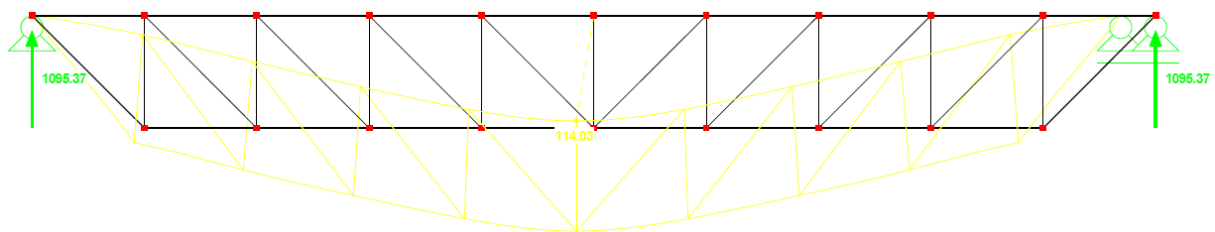


Abbildung 4.2.2.3.4 Variante 3 – Auflagerkräfte und Durchbiegung

Wie bereits bei allen vorgespannten Vorgängervarianten ist auch hier ein deutlicher Einfluss auf die Verformung zu erkennen. So kommt es nur noch zu einer Durchbiegung von 114mm und einer nach innen gerichteten Loslagerverschiebung von 37,3mm. Die Auflagerreaktionen hingegen bleiben wie immer bei einer externen Vorspannung unverändert und bleiben somit unbeeinflusst.

4.2.2.4 Variante 4 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Die Variante 4 soll nun auch mittels den externen Spannelementen (EX-36) in ihrem Tragverhalten „unterstützt“ werden. Obwohl man dabei von einer externen Vorspannung spricht, da sie nur an zwei Punkten mit der Tragstruktur verbunden ist, wird die zusätzliche Spannkonstruktion innerhalb der Hohlprofile verlaufen. Aufgrund des höheren Fertigungsaufwandes und den scheinbar geringen Auswirkungen der

Umlenkpunkte, wird sich auf einen Verlauf entlang des parallel verlaufenden Teil des Untergurtes (Stäbe 11 bis 18, siehe Abb. 4.2.2.4.1) beschränkt.

Da sich in den vorgespannten Varianten 1 bis 3 bereits andeutete, dass ein Einsatz von Spannelementen zu relativ großen und ausschließlich Druckkräften im Untergurt führte, wird in der Variante 4 die Anzahl der Spannelemente auf 1 Stk. und dessen Gesamtvorspannkraft auf 1600kN reduziert (siehe Abb. 4.2.2.4.1).

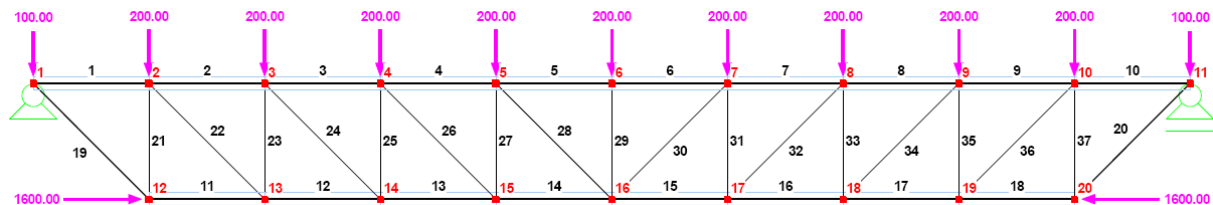


Abbildung 4.2.2.4.1 Variante 4 – generierte Stabstruktur

Analog zum Kapitel 4.2.1.4 soll auch bei der vorgespannten Variante versucht werden die jeweilige Auslastung der einzelnen Stäbe zu maximieren und die Auswirkungen der Vorspannung auf eine evtl. Materialersparnis zu verdeutlichen. Die Verteilung der Profilquerschnitte auf die einzelnen Tragstäbe, abweichend zu nicht vorgespannten Variante, erfolgt dabei wie nachfolgend dargestellt:

Stab 1 & 10: Ro 323,9x5,0	Stab 2 & 9: Ro 323,9x8,8	Stab 3 & 8: Ro 355,6x11
Stab 4 & 7: Ro 355,6x12,5	Stab 5 & 6: Ro 355,6x12,5	Stab 11 & 18: Ro 323,9x4,5
Stab 12 & 17: Ro 168,3x2,9	Stab 13 & 16: Ro 168,3x5,6	Stab 14 & 15: 168,3x8,8
Stab 19 & 20: Ro 323,9x6,3	Stab 21 & 37: Ro 323,9x5,0	Stab 22 & 36: Ro 193,7x8,0
Stab 23 & 35: Ro 271,0x5,0	Stab 24 & 34: Ro 139,7x8,0	Stab 25 & 33: Ro219,1x5,0
Stab 26 & 32: Ro 114,3x6,0	Stab 27 & 31: Ro 168,3x5,0	Stab 28 & 30: Ro 76,1x2,6
Stab 29: Ro 139,7x4,5		

Durch die veränderten Querschnitte ergibt sich selbstverständlich auch eine neue Gesamtmasse des Tragwerks von ~10.110kg bzw. 10,11to. Bei dieser Masse bleibt das Spannelement vorerst unberücksichtigt.

Die für diese generierte Tragstruktur resultierenden Schnittgrößen (Abb. 4.2.2.4.2) und Verformungen (Abb. 4.2.2.4.3) aus wirkender Belastung und externer Vorspannung sind nachfolgend dargestellt.



Abbildung 4.2.2.4.2 Variante 4 – Schnittgrößen (Normalkräfte)

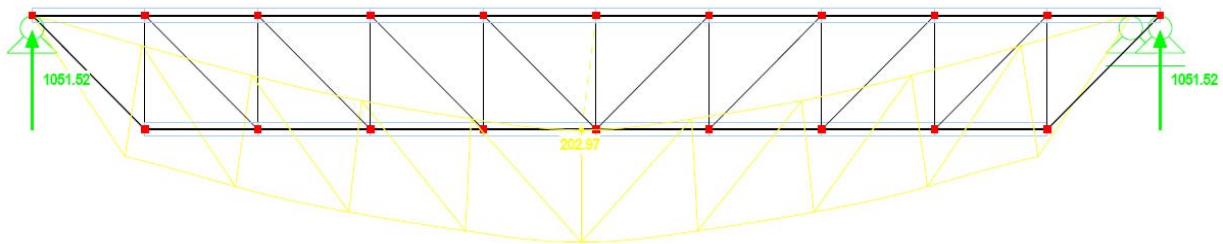


Abbildung 4.2.2.4.3 Variante 4 – Auflagerkräfte und Durchbiegung

4.3 Untersuchung der einzelnen Varianten

Die in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 aufgeführten Tragwerksvarianten werden nun näher untersucht. Da bereits die Belastungen feststehen und die Schnittgrößen und Verformungen per Berechnungssoftware ermittelt wurden, werden nun ausgewählte Stäbe des Gesamtsystems aus den verschiedenen Varianten entsprechend ihrer Grenzzustände miteinander verglichen.

Für die Nachweisführung ist es dabei vorerst egal welche Auslastung der einzelnen Stäbe vorliegt. Sie werden in diesem Kapitel hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und ihrer Gebrauchstauglichkeit untersucht und miteinander verglichen bzw. die Auswirkungen der Vorspannung auf das Gesamtsystem sichtbar gemacht.

4.3.1 Nachweis der Tragfähigkeit

Die Nachweise zur Tragfähigkeit [5] der einzelnen Stäbe könnten ebenfalls durch eine Berechnungssoftware ausgeführt werden. Zur besseren Nachvollziehbarkeit und Veranschaulichung werden diese wie nachfolgend dargestellt, entsprechend der DIN 18800, für ausgewählte Stäbe ohne Berechnungssoftware durchgeführt.

Dabei sollen jeweils Zug- und Druckstäbe der Ober-, Untergurte, Diagonalen und Pfosten berücksichtigt werden. Für Zugstäbe wird ein einfacher Spannungsnachweis als ausreichend betrachtet, hingegen für Druckstäbe ein Biegeknicknachweis geführt wird. Da in der Tragwerksstruktur auch sogenannte „offene Profile“ zum Einsatz kommen und diese teilweise ebenfalls auf Druck beansprucht werden ist zusätzlich ein Biegedrillknicknachweis (Kippen) zu führen.

4.3.1.1 Variante 1 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Die Tragfähigkeitsnachweise werden an nachfolgend aufgeführten und eher zufällig ausgewählten Stäben der Variante 1 (siehe Kapitel 4.2.1.1) durchgeführt:

- Stab Nr. 1, HEA 400 (Zugstab, Untergurt)
- Stab Nr. 5, HEA 400 (Zugstab, Untergurt)
- Stab Nr. 17, HEA 400 (Druckstab, Obergurt)
- Stab Nr. 22, QR 140x10 (Zugstab, Diagonale)
- Stab Nr. 23, QR 180x10 (Druckstab, Diagonale)

Die jeweiligen Querschnittswerte werden dabei den Profiltabellen [12] entnommen.

Spannungsnachweis der Zugstäbe [5]

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{N_d/A}{\delta_{R,d}} \leq 1,0$$

- Stab Nr. 1:

$$\delta_d = \frac{508,32 \text{ kN}}{159 \text{ cm}^2} = 3,19 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{R,d} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{3,19 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,14 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 5:

$$\delta_d = \frac{2661,36 \text{ kN}}{159 \text{ cm}^2} = 16,74 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{R,d} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{16,74 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,76 < 1,0$$

- Stab Nr. 22:

$$\delta_d = \frac{1070,66 \text{ kN}}{50,9 \text{ cm}^2} = 21,03 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{R,d} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{21,03 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,96 < 1,0$$

Biegeknicknachweis der Druckstäbe [5]

$$NW: \frac{N_d}{\kappa \times N_{pl,d}} = \frac{N_d}{\kappa \times \delta_{R,d} \times A} \leq 1,0$$

Für die Ermittlung der Knicklänge bei Fachwerkstäben gilt:

- rechtwinklig zur Fachwerkebene: $s_k = \text{Stablänge bzw. Stabzuglänge}$
- in der Fachwerkebene (z-Richtung) $s_k = 0,9 \times \text{Stablänge}$

Zur Nachweisführung wird der ungünstigste Fall und somit die maximale Knicklänge der Stäbe für waagerechte und diagonale Stabrichtungen betrachtet.

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta \times l = \text{Stablänge} = 600 \text{ cm bzw. } 671 \text{ cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta \times l/2 = \text{Stablänge}/2 = 300 \text{ cm}$$

$$\text{bezogener Schlankheitsgrad: } \overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{s_k/i}{\lambda_a} \rightarrow \kappa$$

- Stab Nr. 17:

$$\overline{\lambda}_{k,y} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/16,8\text{cm}}{92,9} = 0,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,96$$

$$NW_y: \frac{2711,86 \text{ kN}}{0,96 \times 3470 \text{ kN}} = 0,81 < 1,0$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{300\text{cm}/7,34\text{cm}}{92,9} = 0,44 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,91$$

$$NW_z: \frac{2711,86 \text{ kN}}{0,91 \times 3470 \text{ kN}} = 0,88 < 1,0$$

- Stab Nr. 23:

$$\overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{671\text{cm}/6,91\text{cm}}{92,9} = 1,04 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,64$$

$$NW: \frac{844,11 \text{ kN}}{0,64 \times 21,82 \text{ kN/cm}^2 \times 66,9\text{cm}^2} = 0,90 < 1,0$$

Biegedrillknicknachweis der Druckstäbe mit offenen Profilquerschnitten [5]

Trotz der relativ geringen Momente wird für offene Profile ein Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800 empfohlen und durchgeführt.

$$NW: \frac{N_d}{\kappa_z \times N_{pl,d}} + \frac{M_{y,d}}{\kappa_M \times M_{pl,y,d}} \times k_y \leq 1,0$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta_z \times l = 300\text{cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta_y \times l = 600\text{cm}$$

$$\text{Bemessungswert der Normalkraft: } N_{Ki,z,d} = \frac{\pi \times E \times I_z}{s_{k,z}^2 \times \gamma_M}$$

$$\text{bezogener Schlankheitsgrad: } \overline{\lambda}_{k,z} = \sqrt{\frac{N_{pl,d}}{N_{Ki,z,d}}} \rightarrow \kappa_z$$

$$\text{ideales Biegedrillknickmoment: } M_{Ki,y,d} = \frac{1,32 \times b \times t \times E \times I_y}{l \times h^2 \times \gamma_M} \quad (h \leq 600\text{mm})$$

$$\text{bezogener Schlankheitsgrad: } \overline{\lambda}_M = \sqrt{\frac{M_{pl,y,d}}{M_{Ki,y,d}}} \rightarrow \kappa_M$$

$$\text{Momentenbeiwert für Biegedrillknicken: } \beta_{M,y} = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} \times (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$$

$$a_y = 0,15 \times \overline{\lambda}_{k,z} \times \beta_{M,y} - 0,15 \leq 0,9$$

$$\text{Beiwert für Momentenverlauf: } k_y = 1 - \frac{N_d}{\kappa_z \times N_{pl,d}} \times a_y \leq 1,0$$

- Stab Nr. 17:

$$N_{Ki,z,d} = \frac{3,1416 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 8560 \text{ cm}^4}{300^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 6704,38 \text{ kN}$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \sqrt{\frac{3470 \text{ kN}}{6704,38 \text{ kN}}} = 0,71 \rightarrow \kappa_z = 0,85$$

$$M_{Ki,y,d} = \frac{1,32 \times 30 \text{ cm} \times 1,9 \text{ cm} \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 45070 \text{ cm}^4}{600 \text{ cm} \times 38^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 74721 \text{ kNcm}$$

$$\overline{\lambda}_M = \sqrt{\frac{575 \text{ kNm}}{747,21 \text{ kNm}}} = 0,88 \rightarrow \kappa_M (n=2,5) = 0,845$$

$$\beta_{M,y} = 1,1 + \frac{5,61 \text{ kNm}}{55,77 \text{ kNm}} \times (1,3 - 1,1) = 1,12$$

$$a_y = 0,15 \times 0,71 \times 1,12 - 0,15 = 0,03 \leq 0,9$$

$$k_y = 1 - \frac{2711,86 \text{ kN}}{0,85 \times 3470 \text{ kN}} \times 0,03 = 0,97 \leq 1,0$$

$$NW: \frac{2711,86 \text{ kN}}{0,85 \times 3470 \text{ kN}} + \frac{55,77 \text{ kNm}}{0,845 \times 575 \text{ kNm}} \times 0,97 = 1,03 \approx 1,0$$

Der Biegedrillknicknachweis erfolgte unter Berücksichtigung einer Vielzahl an Lastfaktoren und kann somit im Grenzbereich als erbracht angesehen werden. Darüberhinaus wurde, in den einzelnen Varianten 1 bis 3, lediglich eine Nachweisführung und keine Querschnittsoptimierung durchgeführt.

4.3.1.2 Variante 2 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Wie bereits bei der Variante 1 werden die Tragfähigkeitsnachweise an eher zufällig ausgewählten Stäben (nachfolgend aufgelistet) durchgeführt. Es handelt sich dabei um folgende Stäbe der Variante 2 (siehe Kapitel 4.2.1.2):

- Stab Nr. 5, HEA 400 (Druckstab, Obergurt)
- Stab Nr. 14, HEA 400 (Zugstab, Untergurt)
- Stab Nr. 19, HEA 400 (Zugstab, Untergurt)
- Stab Nr. 21, QR 200x8 (Druckstab, Pfosten)
- Stab Nr. 24, QR 110x10 (Zugstab, Diagonale)
- Stab Nr. 25, QR 160x7,1 (Druckstab, Pfosten)
- Stab Nr. 29, QR 120x5 (Druckstab, Pfosten)

Die jeweiligen Querschnittswerte sind wieder den Profiltabellen [12] zu entnehmen.

Spannungsnachweis der Zugstäbe [5]

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{N_d/A}{\delta_{R,d}} \leq 1,0$$

- Stab Nr. 14:

$$\delta_d = \frac{2609,61 \text{ kN}}{159 \text{ cm}^2} = 16,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{R,d} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{16,41 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,75 < 1,0$$

- Stab Nr. 19:

$$\delta_d = \frac{1404,20 \text{ kN}}{159 \text{ cm}^2} = 8,83 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{R,d} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{8,83 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,40 < 1,0$$

- Stab Nr. 24:

$$\delta_d = \frac{780,13 \text{ kN}}{38,5 \text{ cm}^2} = 20,26 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{R,d} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{20,26 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,93 < 1,0$$

Biegeknicknachweis der Druckstäbe [5]

$$NW: \frac{N_d}{\kappa \times N_{pl,d}} = \frac{N_d}{\kappa \times \delta_{R,d} \times A} \leq 1,0$$

Für die Ermittlung der Knicklängen bei Fachwerkstäben gelten die bereits im vorangegangenen Kapitel (4.3.1.1) aufgeführten Grundregeln.

Da auch hier nur der ungünstigste Fall betrachtet werden soll, wird ebenfalls von dem Maximalwert der lot- bzw. waagerechten und diagonalen Knicklängen ausgegangen. Alle Diagonalstäbe werden auf Zug beansprucht, daraus ergibt sich die Knicklänge der nachzuweisenden Stäbe wie folgt:

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta \times l = \text{Stablänge} = 600\text{cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta \times l/2 = \text{Stablänge}/2 = 300\text{cm}$$

$$\text{bezogener Schlankheitsgrad: } \overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{s_k/i}{\lambda_a} \rightarrow \kappa$$

- Stab Nr. 5:

$$\overline{\lambda}_{k,y} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/16,8\text{cm}}{92,9} = 0,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,96$$

$$NW_y: \frac{2703,82\text{ kN}}{0,96 \times 3470\text{ kN}} = 0,81 < 1,0$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{300\text{cm}/7,34\text{cm}}{92,9} = 0,44 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,91$$

$$NW_z: \frac{2703,82\text{ kN}}{0,91 \times 3470\text{ kN}} = 0,86 < 1,0$$

- Stab Nr. 21:

$$\overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/7,81\text{cm}}{92,9} = 0,83 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,78$$

$$NW: \frac{971,31\text{ kN}}{0,78 \times 21,82\text{ kN/cm}^2 \times 60,8\text{cm}^2} = 0,94 < 1,0$$

- Stab Nr. 25:

$$\bar{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/6,19\text{cm}}{92,9} = 1,04 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,64$$

$$NW: \frac{536,31\text{ kN}}{0,64 \times 21,82\text{ kN/cm}^2 \times 42,1\text{cm}^2} = 0,91 < 1,0$$

- Stab Nr. 29:

$$\bar{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/4,68\text{cm}}{92,9} = 1,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,43$$

$$NW: \frac{189,16\text{ kN}}{0,43 \times 21,82\text{ kN/cm}^2 \times 22,7\text{cm}^2} = 0,89 < 1,0$$

Biegedrillknicknachweis der Druckstäbe mit offenen Profilquerschnitten [5]

Obwohl es auch bei dieser Variante zu relativ geringen Momenten in den Stäben kommt wird ein Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800 für offene Profile empfohlen und nachfolgend durchgeführt:

$$NW: \frac{N_d}{\kappa_z \times N_{pl,d}} + \frac{M_{y,d}}{\kappa_M \times M_{pl,y,d}} \times k_y \leq 1,0$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta_z \times l = 300\text{cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta_y \times l = 600\text{cm}$$

- Stab Nr. 5:

$$N_{Ki,z,d} = \frac{3,1416 \times 21000\text{ kN/cm}^2 \times 8560\text{ cm}^4}{300^2\text{cm}^2 \times 1,1} = 5704,38\text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_{k,z} = \sqrt{\frac{3470\text{ kN}}{5704,38\text{ kN}}} = 0,78 \rightarrow \kappa_z = 0,81$$

$$M_{Ki,y,d} = \frac{1,32 \times 30 \text{ cm} \times 1,9 \text{ cm} \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 45070 \text{ cm}^4}{600 \text{ cm} \times 38^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 74721 \text{ kNcm}$$

$$\bar{\lambda}_M = \sqrt{\frac{575 \text{ kNm}}{747,21 \text{ kNm}}} = 0,88 \rightarrow \kappa_M (n=2,5) = 0,845$$

$$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \times \psi = 1,8 - 0,7 \times \frac{22,73 \text{ kNm}}{80,90 \text{ kNm}} = 1,60$$

$$a_y = 0,15 \times 0,78 \times 1,60 - 0,15 = 0,04 \leq 0,9$$

$$k_y = 1 - \frac{2703,82 \text{ kN}}{0,81 \times 3470 \text{ kN}} \times 0,04 = 0,96 \leq 1,0$$

$$NW: \frac{2703,82 \text{ kN}}{0,81 \times 3470 \text{ kN}} + \frac{80,90 \text{ kNm}}{0,845 \times 575 \text{ kNm}} \times 0,96 = 1,12 > 1,0$$

Der Biegedrillknicknachweis des Druckstabes Nr. 5 entlang des Obergurtes ist somit nicht erfüllt. Für die später noch folgenden Vergleichsrechnungen und den weiteren Verlauf dieser Diplomarbeit wird dies vorerst vernachlässigt. Bei einer vollständigen Tragwerksplanung darf dieser Fakt allerdings nicht vernachlässigt werden. Durch konstruktive Umgestaltung und/oder eine veränderte Profilform ist ein Ausweichen des Querschnittes senkrecht zu seiner „schwachen“ Achse aufgrund des Biegedrillknickens relativ einfach zu verhindern bzw. zu beeinflussen. Zwei relativ einfache und noch während der Fertigung oder Montage realisierbare Methoden sind das Anbringen von z.B. Winkelprofilen, üblich im Kranbau, am Profilogbergurt oder das seitliche Verschließen des offenen Profils durch Blechstreifen deren Breite dabei ungefähr der Trägerhöhe entspricht.

4.3.1.3 Variante 3 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Aufgrund der Baugleichheit gelten die bereits für die Variante 2 durchgeführten Nachweise zur Tragfähigkeit und werden in diesem Kapitel nicht erneut geführt.

Somit ist auch klar, dass es sich bei der Nachweisführung um die bereits für die Variante 2 ausgewählten Stäbe handelt.

4.3.1.4 Variante 4 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Die Tragfähigkeitsnachweise der Variante 4 sollten eine hohe Auslastung der einzelnen Stäbe bzw. der Gesamtkonstruktion ergeben. Zur Veranschaulichung der Beweisführung wurden bereits in den vorangegangenen Varianten eine ausreichende Anzahl an Nachweisen geführt. Bei dieser Variante wird lediglich die Nachweisführung der Zug- und Druckstäbe angedeutet, sowie die erreichten Auslastungen ausführlicher dargestellt.

Spannungsnachweis der Zugstäbe [5]

$$\delta_d = \frac{F_d}{A}$$

$$\delta_{R,d,S235} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} \leq 1,0$$

Auslastung im Spannungsnachweis der Zugstäbe

Stab-Nr.:	Querschnitt	Fläche [cm ²]	Zugkraft [kN]	Spannung [kN/cm ²]	Ausnutzung [%]
11 & 18	Ro 323,9 x 4,5	45,15	957,57	21,21	97
12 & 17	Ro 323,9 x 8	79,39	1703,63	21,46	98
13 & 16	Ro 323,9 x 10	98,61	2226,46	22,58	103
14 & 15	Ro 323,9 x 12	117,58	2564,58	21,81	100
19 & 20	Ro 323,9 x 6	59,92	1335,86	22,29	102
22 & 36	Ro 193,7 x 8	46,67	1056,19	22,63	103
24 & 34	Ro 139,7 x 8	33,10	754,31	21,78	100
26 & 32	Ro 114,3 x 6	20,41	446,52	21,88	100
28 & 30	Ro 60,3 x 3,2	5,74	115,09	20,05	92

Die geringfügigen Überschreitungen der zulässigen Spannungen werden für diese Abschlussarbeit vernachlässigt, da sie erstens ausschließlich bei der maximalen Belastung auftreten und zweitens in diesem Fall zur Veranschaulichung der Wirtschaftlichkeit dienen. In der Realität ist es nicht empfehlenswert Querschnitte in diesen Dimensionen auszulasten, da für die Bemessung zwar ausreichend Sicherheitsbeiwerte eingefügt werden, jedoch z.B. Herstellungsungenauigkeiten der Hohlprofile und theoretische bzw. praktische Schweißnahtstärken unberechenbar variieren können.

Biegeknicknachweis für Druckstäbe [5]

$$NW: \frac{N_d}{\kappa \times N_{pl,d}} = \frac{N_d}{\kappa \times \delta_{R,d} \times A} \leq 1,0$$

$$(\delta_{R,d,S235} = 21,82 \text{ kN/cm}^2)$$

$$\text{Knicklänge: } s_k = \beta \times l = \text{Stablänge} = 600 \text{ cm}$$

$$\overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{s_k/i}{92,9} \rightarrow \kappa_{(a)}$$

Auslastung im Biegeknicknachweis für Druckstäbe

Stab-Nr.:	Querschnitt	Fläche [cm ²]	Trägheits- radius (i) [cm]	Knick- beiwerte ($\overline{\lambda}_k, \kappa_{(a)}$)	Druck- kraft [kN]	Aus- nutzung [%]
1 & 10	Ro 323,9 x 5	50,09	11,28	0,57 → 0,90	957,57	0,97
2 & 9	Ro 323,9 x 8,8	87,11	11,14	0,58 → 0,90	1703,63	0,99
3 & 8	Ro 355,6 x 11	119,09	12,19	0,53 → 0,91	2236,46	0,95
4 & 7	Ro 355,6 x 12,5	134,74	12,14	0,53 → 0,91	2564,58	0,96
5 & 6	Ro 355,6 x 12,5	134,74	12,14	0,53 → 0,91	2645,88	0,99
21 & 37	Ro 323,9 x 5	50,09	11,28	0,57 → 0,90	949,97	0,96
23 & 35	Ro 273,0 x 5	42,10	9,48	0,68 → 0,86	743,29	0,94
25 & 33	Ro 219,1 x 5	33,63	7,57	0,85 → 0,76	529,98	0,95
27 & 31	Ro 168,3 x 5	25,65	5,78	1,12 → 0,58	310,68	0,96
29	Ro 139,7 x 4,5	19,11	4,78	1,35 → 0,44	175,88	0,96

Da sich die Variante 4 ausschließlich aus geschlossenen Profilquerschnitten zusammensetzt, entfällt ein Biegedrillknicknachweis. Stattdessen ist bei geschweißten Knoten aus Hohlprofilen zusätzlich ein Gestaltsfestigkeits- bzw. Wanddickennachweis zu führen. Der „Durchstanznachweis“ für Hohlprofile zählt zwar zu den Tragfähigkeitsnachweisen, wird aber gesondert in Kapitel 4.3.3 durchgeführt.

4.3.1.5 Variante 1 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Nachdem nun die Tragfähigkeitsnachweise an den nicht vorgespannten Tragwerken abgehandelt worden sind, werden diese nun selbstverständlich auch für die vorgespannten Varianten durchgeführt. Um die Auswirkungen der Vorspannung zu verdeutlichen werden die bereits im Kapitel 4.3.1.1 ausgewählten Stäbe betrachtet. Die einzige Änderung bleibt das Ergänzen der Zugelemente in der Nachweisführung.

- Spannelement „EX-36“ (Zugstab, extern entlang des Untergurtes)
- Stab Nr. 1, HEA 400 (Druckstab, Untergurt)
- Stab Nr. 5, HEA 400 (Druckstab, Untergurt)
- Stab Nr. 17, HEA 400 (Druckstab, Obergurt)
- Stab Nr. 22, QR 140x10 (Zugstab, Diagonale)
- Stab Nr. 23, QR 180x10 (Druckstab, Diagonale)

Spannungsnachweis der Zugstäbe [5]

- Spannelement:

$$NW: = \frac{V}{P_{0,max}} = \frac{750 \text{ kN}}{1731 \text{ kN}} = 0,43 < 1,0$$

Die Stäbe Nr. 1 und Nr. 5, welche bei der nicht vorgespannten Variante noch auf Zug belastet worden sind, sind durch die Wirkung der Vorspannelemente nun auf Druck beansprucht, so dass ein Spannungsnachweis für diese Stäbe entfällt.

- Stab Nr. 22:

$$\sigma_d = \frac{1069,50 \text{ kN}}{50,9 \text{ cm}^2} = 21,01 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{R,d} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{21,01 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,96 < 1,0$$

Biegeknicknachweis der Druckstäbe [5]

$$NW: \frac{N_d}{\kappa \times N_{pl,d}} = \frac{N_d}{\kappa \times \delta_{R,d} \times A} \leq 1,0$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta \times l = \text{Stablänge} = 600 \text{ cm bzw. } 671 \text{ cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta \times l/2 = \text{Stablänge}/2 = 300 \text{ cm (OG \& UG)}$$

$$\text{bezogener Schlankheitsgrad: } \overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{s_k/i}{\lambda_a} \rightarrow \kappa$$

- Stab Nr. 1:

$$\overline{\lambda}_{k,y} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600 \text{ cm}/16,8 \text{ cm}}{92,9} = 0,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,96$$

$$NW_y: \frac{2486,12 \text{ kN}}{0,96 \times 3470 \text{ kN}} = 0,75 < 1,0$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{300 \text{ cm}/7,34 \text{ cm}}{92,9} = 0,44 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,91$$

$$NW_z: \frac{2486,12 \text{ kN}}{0,91 \times 3470 \text{ kN}} = 0,79 < 1,0$$

- Stab Nr. 5:

$$\overline{\lambda}_{k,y} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/16,8\text{cm}}{92,9} = 0,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,96$$

$$NW_y: \frac{333,93 \text{ kN}}{0,96 \times 3470 \text{ kN}} = 0,10 \ll 1,0$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{300\text{cm}/7,34\text{cm}}{92,9} = 0,44 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,91$$

$$NW_z: \frac{333,93 \text{ kN}}{0,91 \times 3470 \text{ kN}} = 0,11 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 17:

$$\overline{\lambda}_{k,y} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/16,8\text{cm}}{92,9} = 0,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,96$$

$$NW_y: \frac{2716,58 \text{ kN}}{0,96 \times 3470 \text{ kN}} = 0,82 < 1,0$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{300\text{cm}/7,34\text{cm}}{92,9} = 0,44 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,91$$

$$NW_z: \frac{2716,58 \text{ kN}}{0,91 \times 3470 \text{ kN}} = 0,86 < 1,0$$

- Stab Nr. 23:

$$\overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{671 \text{ cm}/6,91 \text{ cm}}{92,9} = 1,04 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,64$$

$$NW: \frac{842,58 \text{ kN}}{0,64 \times 21,82 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 66,9\text{cm}^2} = 0,90 < 1,0$$

Biegedrillknicknachweis der Druckstäbe mit offenen Profilquerschnitten [5]

Auch bei dieser Variante wird natürlich ein Biegedrillknicknachweis für offene Profilquerschnitte durchgeführt. Aufgrund der Auslastung der einzelnen Druckstäbe wird dieser Nachweis allerdings nur für den Stab Nr. 17 näher betrachtet.

$$NW: \frac{N_d}{\kappa_z \times N_{pl,d}} + \frac{M_{y,d}}{\kappa_M \times M_{pl,y,d}} \times k_y \leq 1,0$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta_z \times l = 300 \text{ cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta_y \times l = 600 \text{ cm}$$

- Stab Nr. 17:

$$N_{Ki,z,d} = \frac{3,1416 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 8560 \text{ cm}^4}{300^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 6704,38 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_{k,z} = \sqrt{\frac{3470 \text{ kN}}{6704,38 \text{ kN}}} = 0,71 \rightarrow \kappa_z = 0,85$$

$$M_{Ki,y,d} = \frac{1,32 \times 30 \text{ cm} \times 1,9 \text{ cm} \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 45070 \text{ cm}^4}{600 \text{ cm} \times 38^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 74721 \text{ kNcm}$$

$$\bar{\lambda}_M = \sqrt{\frac{575 \text{ kNm}}{747,21 \text{ kNm}}} = 0,88 \rightarrow \kappa_M (n=2,5) = 0,845$$

$$\beta_{M,y} = 1,1 + \frac{5,62 \text{ kNm}}{41,63 \text{ kNm}} \times (1,3 - 1,1) = 1,13$$

$$a_y = 0,15 \times 0,71 \times 1,13 - 0,15 = 0,03 \leq 0,9$$

$$k_y = 1 - \frac{2716,58 \text{ kN}}{0,85 \times 3470 \text{ kN}} \times 0,03 = 0,97 \leq 1,0$$

$$NW: \frac{2716,58 \text{ kN}}{0,85 \times 3470 \text{ kN}} + \frac{41,63 \text{ kNm}}{0,845 \times 575 \text{ kNm}} \times 0,97 = 1,004 \approx 1,0$$

Das Ergebnis des Nachweises auf Biegedrillknicken ist ähnlich der in Kapitel 4.3.1.1 berechneten Variante 1 ohne Vorspannung bzw. noch eine Kleinigkeit günstiger, aber im Grenzbereich. Eine Anpassung der Querschnitte wäre somit sinnvoll.

4.3.1.6 Variante 2 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Unter Berücksichtigung der Vorspannung werden nun die Auswirkungen für die Variante 2 betrachtet und die Tragfähigkeitsnachweise durchgeführt. Analog zur Variante 1 werden dabei nur die bereits beim nicht vorgespannten Stabtragwerk ausgewählten Stäbe untersucht.

- Stab Nr. 5, HEA 400 (Druckstab, Obergurt)
- Stab Nr. 14, HEA 400 (Druckstab, Untergurt)
- Stab Nr. 19, HEA 400 (Druckstab, Untergurt)
- Stab Nr. 21, QR 200x8 (Druckstab, Pfosten)
- Stab Nr. 24, QR 110x10 (Zugstab, Diagonale)
- Stab Nr. 25, QR 160x7,1 (Druckstab, Pfosten)
- Stab Nr. 29, QR 120x5 (Druckstab, Pfosten)

Die jeweiligen Querschnittswerte sind wieder den Profiltabellen [12] zu entnehmen.

Spannungsnachweis der Zugstäbe [5]

- Spannelement:

$$NW: = \frac{V}{P_{0,max}} = \frac{750 \text{ kN}}{1731 \text{ kN}} = 0,43 < 1,0$$

Eine erste, und deutlich sichtbare Auswirkung ist die Umkehrung der Belastung aller Stäbe des Untergurtes. Die Stäbe Nr. 14 und Nr. 19, welche bei der nicht vorgespannten Variante noch auf Zug belastet worden sind, sind nun durch die Wirkung der Vorspannelemente auf Druck beansprucht. Aus diesem Grund kann ein

einfacher Spannungsnachweis entfallen und muss durch einen Biegeknick- bzw. Biegedrillknicknachweis ersetzt werden.

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{N_d/A}{\delta_{R,d}} \leq 1,0$$

- Stab Nr. 24:

$$\delta_d = \frac{784,08 \text{ kN}}{38,5 \text{ cm}^2} = 20,37 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{R,d} = \frac{24,0 \text{ kN/cm}^2}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{20,37 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,93 < 1,0$$

Biegeknicknachweis der Druckstäbe [5]

$$NW: \frac{N_d}{\kappa \times N_{pl,d}} = \frac{N_d}{\kappa \times \delta_{R,d} \times A} \leq 1,0$$

Für die Ermittlung der Knicklängen bei Fachwerkstäben gelten die bereits in den vorangegangenen Kapiteln aufgeführten Grundregeln.

Da auch hier nur der ungünstigste Fall betrachtet werden soll, wird ebenfalls von dem Maximalwert der lot- bzw. waagerechten und diagonalen Knicklängen ausgegangen. Da zwei der Diagonalstäbe auf Druck beansprucht werden, ergeben sich die Knicklängen wie folgt:

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta \times l = \text{Stablänge} = 600 \text{ cm bzw. } 671 \text{ cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta \times l/2 = \text{Stablänge}/2 = 300 \text{ cm}$$

$$\text{bezogener Schlankheitsgrad: } \bar{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{s_k/i}{\lambda_a} \rightarrow \kappa$$

- Stab Nr. 5:

$$\overline{\lambda_{k,y}} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/16,8\text{cm}}{92,9} = 0,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,96$$

$$NW_y: \frac{2702,32 \text{ kN}}{0,96 \times 3470 \text{ kN}} = 0,81 < 1,0$$

$$\overline{\lambda_{k,z}} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{300\text{cm}/7,34\text{cm}}{92,9} = 0,44 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,91$$

$$NW_z: \frac{2702,32 \text{ kN}}{0,91 \times 3470 \text{ kN}} = 0,86 < 1,0$$

- Stab Nr. 14:

$$\overline{\lambda_{k,y}} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/16,8\text{cm}}{92,9} = 0,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,96$$

$$NW_y: \frac{384,67 \text{ kN}}{0,96 \times 3470 \text{ kN}} = 0,12 \ll 1,0$$

$$\overline{\lambda_{k,z}} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{300\text{cm}/7,34\text{cm}}{92,9} = 0,44 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,91$$

$$NW_z: \frac{384,67 \text{ kN}}{0,91 \times 3470 \text{ kN}} = 0,12 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 19:

$$\overline{\lambda_{k,y}} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{848\text{cm}/16,8\text{cm}}{92,9} = 0,54 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,91$$

$$NW_y: \frac{1581,57 \text{ kN}}{0,91 \times 3470 \text{ kN}} = 0,50 < 1,0$$

$$\overline{\lambda_{k,z}} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{848\text{cm}/7,34\text{cm}}{92,9} = 1,24 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,46$$

$$NW_z: \frac{1581,57 \text{ kN}}{0,46 \times 3470 \text{ kN}} = 0,99 \sim 1,0$$

Durch das gleichzeitige Wirken einer Normalkraft und einem Biegemoment auf einen Stab mit einem offenen Profilquerschnitt muss zusätzlich ein Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800 geführt werden. Da bereits bei einem Biegeknicknachweis, welcher nur unter Berücksichtigung der Normalkraft geführt wird, die Ausnutzung bei knapp 100% liegt, wird ein Nachweis auf Biegedrillknicken fast überflüssig.

- Stab Nr. 21:

$$\bar{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600 \text{ cm} / 7,81 \text{ cm}}{92,9} = 0,83 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,78$$

$$NW: \frac{971,31 \text{ kN}}{0,78 \times 21,82 \text{ kN/cm}^2 \times 60,8 \text{ cm}^2} = 0,94 < 1,0$$

- Stab Nr. 25:

$$\bar{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600 \text{ cm} / 6,19 \text{ cm}}{92,9} = 1,04 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,64$$

$$NW: \frac{536,31 \text{ kN}}{0,64 \times 21,82 \text{ kN/cm}^2 \times 42,1 \text{ cm}^2} = 0,91 < 1,0$$

- Stab Nr. 29:

$$\bar{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600 \text{ cm} / 4,68 \text{ cm}}{92,9} = 1,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,43$$

$$NW: \frac{189,16 \text{ kN}}{0,43 \times 21,82 \text{ kN/cm}^2 \times 22,7 \text{ cm}^2} = 0,89 < 1,0$$

Biegedrillknicknachweis der Druckstäbe mit offenen Profilquerschnitten [5]

Trotz der relativ geringen Momente, in den auf Druck belasteten Stäben, wird auch bei dieser Variante ein Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800 für offene Profile empfohlen und nachfolgend durchgeführt:

$$NW: \frac{N_d}{\kappa_z \times N_{pl,d}} + \frac{M_{y,d}}{\kappa_M \times M_{pl,y,d}} \times k_y \leq 1,0$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta_z \times l = 300\text{cm bzw. } 848\text{cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta_y \times l = 600\text{cm bzw. } 848\text{cm}$$

- Stab Nr. 5:

$$N_{Ki,z,d} = \frac{3,1416 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 8560 \text{ cm}^4}{300^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 5704,38 \text{ kN}$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \sqrt{\frac{3470 \text{ kN}}{5704,38 \text{ kN}}} = 0,78 \rightarrow \kappa_z = 0,81$$

$$M_{Ki,y,d} = \frac{1,32 \times 30 \text{ cm} \times 1,9 \text{ cm} \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 45070 \text{ cm}^4}{600 \text{ cm} \times 38^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 74721 \text{ kNcm}$$

$$\overline{\lambda}_M = \sqrt{\frac{575 \text{ kNm}}{747,21 \text{ kNm}}} = 0,88 \rightarrow \kappa_M (n=2,5) = 0,845$$

$$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \times \psi = 1,8 - 0,7 \times \frac{38,96 \text{ kNm}}{76,77 \text{ kNm}} = 1,44$$

$$a_y = 0,15 \times 0,78 \times 1,44 - 0,15 = 0,02 \leq 0,9$$

$$k_y = 1 - \frac{2703,32 \text{ kN}}{0,81 \times 3470 \text{ kN}} \times 0,02 = 0,98 \leq 1,0$$

$$NW: \frac{2703,32 \text{ kN}}{0,81 \times 3470 \text{ kN}} + \frac{76,77 \text{ kNm}}{0,845 \times 575 \text{ kNm}} \times 0,98 = 1,12 > 1,0$$

- Stab Nr. 14:

Der Biegedrillknicknachweis für den Stab Nr. 14 kann entfallen, da auf den Stab Nr. 5 die neunfache Belastung wirkt und dessen Auslastung bereits nachgewiesen wurde.

- Stab Nr. 19:

$$N_{Ki,z,d} = \frac{3,1416 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 8560 \text{ cm}^4}{848^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 713,93 \text{ kN}$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \sqrt{\frac{3470 \text{ kN}}{713,93 \text{ kN}}} = 2,20 \rightarrow \kappa_z = 0,27$$

$$M_{Ki,y,d} = \frac{1,32 \times 30 \text{ cm} \times 1,9 \text{ cm} \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 45070 \text{ cm}^4}{848 \text{ cm} \times 38^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 52868 \text{ kNcm}$$

$$\overline{\lambda}_M = \sqrt{\frac{575 \text{ kNm}}{528,68 \text{ kNm}}} = 1,04 \rightarrow \kappa_{M(n=2,5)} = 0,73$$

$$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \times \psi = 1,8 - 0,7 \times (-0,135) = 1,89$$

$$a_y = 0,15 \times 2,20 \times 1,89 - 0,15 = 0,47 \leq 0,9$$

$$k_y = 1 - \frac{1581,57 \text{ kN}}{0,27 \times 3470 \text{ kN}} \times 0,47 = 0,21 \leq 1,0$$

$$NW: \frac{1581,57 \text{ kN}}{0,27 \times 3470 \text{ kN}} + \frac{82,57 \text{ kNm}}{0,73 \times 575 \text{ kNm}} \times 0,21 = 1,73 > 1,0$$

Der Biegedrillknicknachweis für den Stab Nr. 19 ergab eine 173%ige Auslastung und ist somit nicht erfüllt. Diese hohe und bereits nach dem Biegeknicknachweis zu

erahnende Auslastung kann durch verschiedene konstruktive Umgestaltungen reduziert werden. Eine Möglichkeit wäre sicherlich das Verändern des Profilquerschnitts, aber die größten Effekte würde man durch die Reduzierung der Knicklänge oder einen veränderten Verlauf der Spannglieder erzielen.

Ein geänderter Spanngliedverlauf z.B. ausschließlich entlang des parallel verlaufenden Untergurtes würde die hohen Druckkräfte für den Diagonalstab reduzieren, vielleicht sogar als Zugstab belassen und die aufwendige Gestaltung eines Umlenkpunktes überflüssig machen. Dies kann sicherlich mit Hilfe der nachfolgenden Variante 3 genauer durchleuchtet werden.

4.3.1.7 Variante 3 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Trotz der geringen Unterschiede zur Variante 2 werden auch für diese Variante die Tragfähigkeitsnachweise an den bereits ausgewählten Stäben durchgeführt:

- Stab Nr. 5, HEA 400 (Druckstab, Obergurt)
- Stab Nr. 14, HEA 400 (Druckstab, Untergurt)
- Stab Nr. 19, HEA 400 (Zugstab, Untergurt)
- Stab Nr. 21, QR 200x8 (Druckstab, Pfosten)
- Stab Nr. 24, QR 110x10 (Zugstab, Diagonale)
- Stab Nr. 25, QR 160x7,1 (Druckstab, Pfosten)
- Stab Nr. 29, QR 120x5 (Druckstab, Pfosten)

Spannungsnachweis der Zugstäbe [5]

- Spannelement:

$$NW := \frac{V}{P_{0,max}} = \frac{750 \text{ kN}}{1731 \text{ kN}} = 0,43 < 1,0$$

Auch bei dieser Variante des Spannelementverlaufs ist deutlich zu erkennen, dass die Normalkräfte in den Untergurtstäben auf Druck beansprucht werden. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Auswirkung der Vorspannung auf den Obergurt minimal ist. Weitere Vor- und Nachteile u.a. hinsichtlich des Spanngliedverlaufs werden in einem später folgenden Kapitel erörtert.

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{N_d/A}{\delta_{R,d}} \leq 1,0$$

- Stab Nr. 19:

$$\delta_d = \frac{1409,96 \text{ kN}}{159,00 \text{ cm}^2} = 8,87 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{8,87 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,41 < 1,0$$

- Stab Nr. 24:

$$\delta_d = \frac{780,06 \text{ kN}}{38,5 \text{ cm}^2} = 20,26 \text{ kN/cm}^2$$

$$NW: \frac{\delta_d}{\delta_{R,d}} = \frac{20,26 \text{ kN/cm}^2}{21,82 \text{ kN/cm}^2} = 0,93 < 1,0$$

Biegeknicknachweis der Druckstäbe [5]

$$NW: \frac{N_d}{\kappa \times N_{pl,d}} = \frac{N_d}{\kappa \times \delta_{R,d} \times A} \leq 1,0$$

Die maßgebenden Knicklängen der einzelnen Stäbe für einen Biegeknicknachweis sind den vorangegangenen Kapiteln zu entnehmen und lauten wie folgt:

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta \times l = \text{Stablänge} = 600 \text{ cm bzw. } 671 \text{ cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta \times l/2 = \text{Stablänge}/2 = 300 \text{ cm}$$

$$\text{bezogener Schlankheitsgrad: } \bar{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{s_k/i}{\lambda_a} \rightarrow \kappa$$

- Stab Nr. 5:

$$\overline{\lambda}_{k,y} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/16,8\text{cm}}{92,9} = 0,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,96$$

$$NW_y: \frac{2702,29 \text{ kN}}{0,96 \times 3470 \text{ kN}} = 0,81 < 1,0$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{300\text{cm}/7,34\text{cm}}{92,9} = 0,44 \rightarrow \kappa_{(b)} = 0,91$$

$$NW_z: \frac{2702,29 \text{ kN}}{0,91 \times 3470 \text{ kN}} = 0,86 < 1,0$$

- Stab Nr. 14:

Der Nachweis für den Druckstab Nr. 14 wird vernachlässigt bzw. kann entfallen, da die Belastung um ein vielfaches geringer ist als bei der Nr.5.

- Stab Nr. 21:

$$\overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/7,78\text{cm}}{92,9} = 0,83 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,78$$

$$NW: \frac{960,84 \text{ kN}}{0,78 \times 21,82 \text{ kN/cm}^2 \times 60,8\text{cm}^2} = 0,931 < 1,0$$

- Stab Nr. 25:

$$\overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/6,19\text{cm}}{92,9} = 1,04 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,64$$

$$NW: \frac{533,97 \text{ kN}}{0,64 \times 21,82 \text{ kN/cm}^2 \times 42,1\text{cm}^2} = 0,91 < 1,0$$

- Stab Nr. 29:

$$\overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{600\text{cm}/4,68\text{cm}}{92,9} = 1,38 \rightarrow \kappa_{(a)} = 0,43$$

$$NW: \frac{188,92 \text{ kN}}{0,43 \times 21,82 \text{ kN/cm}^2 \times 22,7 \text{ cm}^2} = 0,89 < 1,0$$

Biegedrillknicknachweis der Druckstäbe mit offenen Profilquerschnitten [5]

Für auf Druck belastete Stäbe wird auch bei dieser Variante ein Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800 für offene Profile empfohlen und nachfolgend durchgeführt:

$$NW: \frac{N_d}{\kappa_z \times N_{pl,d}} + \frac{M_{y,d}}{\kappa_M \times M_{pl,y,d}} \times k_y \leq 1,0$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,z} = \beta_z \times l = 300 \text{ cm}$$

$$\text{Knicklänge: } s_{k,y} = \beta_y \times l = 600 \text{ cm}$$

- Stab Nr. 5:

$$N_{Ki,z,d} = \frac{3,1416 \times 21000 \text{ kN/cm}^2 \times 8560 \text{ cm}^4}{300^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 5704,38 \text{ kN}$$

$$\overline{\lambda}_{k,z} = \sqrt{\frac{3470 \text{ kN}}{5704,38 \text{ kN}}} = 0,78 \rightarrow \kappa_z = 0,81$$

$$M_{Ki,y,d} = \frac{1,32 \times 30 \text{ cm} \times 1,9 \text{ cm} \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 45070 \text{ cm}^4}{600 \text{ cm} \times 38^2 \text{ cm}^2 \times 1,1} = 74721 \text{ kNcm}$$

$$\overline{\lambda}_M = \sqrt{\frac{575 \text{ kNm}}{747,21 \text{ kNm}}} = 0,88 \rightarrow \kappa_M (n=2,5) = 0,845$$

$$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \times \psi = 1,8 - 0,7 \times \frac{22,17 \text{ kNm}}{81,08 \text{ kNm}} = 1,60$$

$$a_y = 0,15 \times 0,78 \times 1,60 - 0,15 = 0,037 \leq 0,9$$

$$k_y = 1 - \frac{2702,29 \text{ kN}}{0,81 \times 3470 \text{ kN}} \times 0,037 = 0,96 \leq 1,0$$

$$NW: \frac{2702,29 \text{ kN}}{0,81 \times 3470 \text{ kN}} + \frac{81,08 \text{ kNm}}{0,845 \times 575 \text{ kNm}} \times 0,96 = 1,12 > 1,0$$

- Stab Nr. 14 & 19:

Die Biegedrillknicknachweise für die Stäbe Nr. 14 und Nr. 19 können entfallen, da auf den Stab Nr. 5 eine vielfache Belastung wirkt und dessen Auslastung bereits nachgewiesen wurde.

Der Biegedrillknicknachweis für den Stab Nr.5 führt, wie schon bei Variante 2, zu einer 112%igen Auslastung und ist somit nicht erbracht. Maßnahmen diesem ungünstigen Verhältnis entgegenzuwirken wurden bereits in den vorhergehenden Kapiteln erläutert. Für Vergleiche hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit werden Auslastungen der Konstruktion in diesem Umfang natürlich nicht toleriert.

4.3.1.8 Variante 4 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Die für einen Vergleich, unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit, erstellte vorgespannte Tragwerkvariante 4 sollte analog zu Kapitel 4.3.1.4 eine hohe Auslastung der Tragwerkstäbe erreichen. Auf eine ausführliche Darstellung der Nachweisführung wird an dieser Stelle erneut verzichtet (siehe Kapitel 4.3.1.1ff).

Auslastung im Spannungsnachweis der Zugstäbe

Stab-Nr.:	Querschnitt	Fläche [cm²]	Zugkraft [kN]	Spannung [kN/cm²]	Ausnutzung [%]
12 & 17	Ro 168,3 x 2,9	15,07	85,75	5,69	26
13 & 16	Ro 168,3 x 5,6	28,62	610,49	21,33	98
14 & 15	Ro 168,3 x 8,8	44,10	930,66	21,10	97
19 & 20	Ro 323,9 x 6,3	62,86	1342,58	21,36	98
22 & 36	Ro 193,7 x 8	46,67	1041,93	22,32	102
24 & 34	Ro 139,7 x 8	33,10	742,88	22,44	103
26 & 32	Ro 114,3 x 6	20,41	453,26	22,21	102
28 & 30	Ro 76,1 x 2,6	6,00	128,53	21,42	98

Eine relativ geringe Auslastung der Stäbe 12 & 17 resultiert aus dem Zusammenwirken der konstruktiven Gestaltung und der Vorspannung des Untergurtes. Die Tragstäbe mit Zugebelastung erreichten hingegen einen relativ hohen Auslastungsgrad bis hin zu geringfügigen Überschreitungen der 100%.

Auslastung im Biegeknicknachweis für Druckstäbe

Stab-Nr.:	Querschnitt	Fläche [cm ²]	Trägheits- radius (i) [cm]	Knick- beiwerte ($\bar{\lambda}_k, \kappa_{(a)}$)	Druck- kraft [kN]	Aus- nutzung [%]
1 & 10	Ro 323,9 x 5	50,09	11,28	0,57 → 0,90	949,77	97
2 & 9	Ro 323,9 x 8,8	87,11	11,14	0,58 → 0,90	1685,75	98
3 & 8	Ro 355,6 x 11	119,09	12,19	0,53 → 0,91	2210,49	93
4 & 7	Ro 355,6 x 12,5	134,74	12,14	0,53 → 0,91	2530,66	95
5 & 6	Ro 355,6 x 12,5	134,74	12,14	0,53 → 0,91	2621,44	98
11 & 18	Ro 323,9 x 4,5	45,15	11,29	0,57 → 0,90	650,23	73
21 & 37	Ro 323,9 x 5	50,09	11,28	0,57 → 0,90	941,97	96
23 & 35	Ro 273,0 x 5	42,10	9,48	0,68 → 0,86	734,77	93
25 & 33	Ro 219,1 x 5	33,63	7,57	0,85 → 0,76	522,66	94
27 & 31	Ro 168,3 x 5	25,65	5,78	1,12 → 0,58	316,90	98
29	Ro 139,7 x 4,5	19,11	4,78	1,35 → 0,44	180,59	98

Resultierend aus der externen Vorspannung sind die Stäbe 11 & 18 nun auf Druck beansprucht. Eine maximale Auslastung dieser beiden Stäbe, hinsichtlich des Biegeknickens, wurde dennoch nicht angestrebt, da es eine konstruktive Gestaltung der Außenbereiche in der Gesamtkonstruktion erschwert und keine wesentliche Gewichtsersparnis gebracht hätte.

Der für Fachwerkknoten mit geschlossenen Hohlprofilen übliche Gestaltsfestigkeitsnachweis wird zu einem späteren Zeitpunkt geführt.

4.3.2 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit [5] im Stahl- und Metallbau wird in den meisten Fällen anhand von Verformungsnachweisen an einzelnen Stäben oder ganzen Tragstrukturen geführt.

In diesem Kapitel werden nun die Verformungsberechnungen bzw. die Einhaltung der zulässigen Verformung als Nachweis der Gebrauchstauglichkeit geführt.

Die zulässige Verformung oder auch als zulässige Durchbiegung bezeichnet, wird allerdings nicht direkt durch die DIN 18800 begrenzt, so dass unter Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten, bemessen an der zu erwartenden Gefahr, Grenzwerte definiert werden. Ein praxisnaher und für den Stahlbau gängiger Grenzwert ist $l/300$. Dieser kann allerdings entsprechend dem Verwendungszweck oder in Abhängigkeit zu Grundwerkstoffen auch auf Werte wie z.B. $l/150$ oder $l/600$ festgesetzt werden. An den für diese Diplomarbeit ausgesuchten Varianten kommt es aufgrund der Bauweise zur maximalen Durchbiegung in Träger- bzw. Tragwerksmitte. Die Werte der vorhandenen Durchbiegungen, für ausgewählte Stäbe (siehe Kapitel 4.3.1) und das Gesamtsystem, werden dabei den generierten Strukturmodellen der Berechnungssoftware RSTAB entnommen.

4.3.2.1 Variante 1 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis werden jeweils die bereits in Kapitel 4.3.1 ausgewählten Stäbe sowie die Gesamtstruktur näher betrachtet. Für die Variante 1 bedeutet das einen Nachweis ausgewählter Stäbe analog zum Tragsicherheitsnachweis in Kapitel 4.3.1.1 und des Ober- & Untergurtes.

Betrachtet man die Verformungen der einzelnen Stäbe, so wird natürlich die Verschiebung der Knoten durch eine Verformung des Gesamtsystems nicht berücksichtigt. Daher wird von der reinen Stabverformung gesprochen.

Verformungsnachweis der Tragwerksstäbe und Stabzüge

$$NW: \frac{f_{vorh}}{f_{zul}} \leq 1,0$$

- Stab Nr. 1:

$$NW: \frac{0,10 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,05 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 5:

$$NW: \frac{0,23 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,12 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 17:

$$NW: \frac{0,61 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,31 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 22:

$$NW: \frac{0,00 \text{ cm}}{671 \text{ cm}/300} = 0,00 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 23:

$$NW: \frac{0,00 \text{ cm}}{671 \text{ cm}/300} = 0,00 \ll 1,0$$

- Obergurt:

$$NW: \frac{12,79 \text{ cm}}{5400 \text{ cm}/300} = 0,71 < 1,0$$

- Untergurt:

$$NW: \frac{14,89 \text{ cm}}{6000 \text{ cm}/300} = 0,74 < 1,0$$

Der Verformungsnachweis des Gesamtsystems sowie der ausgewählten Stäbe ist somit erfüllt, da alle Verformungen sich im Bereich der zulässigen Grenzen befinden. Die Verformungen, senkrecht zum Querschnitt, der einzelnen Stäbe sind dabei erwartungsgemäß sehr gering ausgefallen. Die Verformungen der auf Zug beanspruchten Stäbe sind logischerweise nicht aufgetreten und nur für eventuell notwendige Direktvergleiche aufgeführt worden.

Betrachtet man die Verformungen des gesamten Systems, speziell deren Ober- und Untergurt so ist eine deutlichere Verformung zu erkennen, welche aber die zulässige Verformung nicht übersteigt. Anhand der Auslastung werden später die Auswirkungen einer Vorspannung verdeutlicht.

4.3.2.2 Variante 2 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Variante 2 gelten ebenfalls die bereits genannten Voraussetzungen bzw. Bedingungen. Die Auswahl der nachzuweisenden Stäbe entspricht Kapitel 4.3.1.2 zuzüglich des Obergurtes sowie dem parallel dazu Verlaufenden Teil des Untergurtes.

Verformungsnachweis der Tragwerksstäbe und Stabzüge

$$NW: \frac{f_{vorh}}{f_{zul}} \leq 1,0$$

- Stab Nr. 5:

$$NW: \frac{0,30 \text{ cm}}{600 \text{ cm} / 300} = 0,15 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 14:

$$NW: \frac{0,31 \text{ cm}}{600 \text{ cm} / 300} = 0,16 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 19:

$$NW: \frac{0,00 \text{ cm}}{848 \text{ cm} / 300} = 0,00 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 21:

$$NW: \frac{0,04 \text{ cm}}{600 \text{ cm} / 300} = 0,02 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 24:

$$NW: \frac{0,00 \text{ cm}}{848 \text{ cm}/300} = 0,00 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 25:

$$NW: \frac{0,04 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,02 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 29:

$$NW: \frac{0,02}{600 \text{ cm}/300} = 0,01 \ll 1,0$$

- Obergurt:

$$NW: \frac{16,67 \text{ cm}}{6000 \text{ cm}/300} = 0,83 < 1,0$$

- Untergurt:

$$NW: \frac{11,59 \text{ cm}}{4800 \text{ cm}/300} = 0,72 < 1,0$$

Die Verformungsnachweise des Gesamtsystems sowie der ausgewählten Stäbe gelten somit als erfüllt, da alle Verformungen sich im Bereich der zulässigen Grenzen befinden. Auch an der zweiten Variante treten keine Verformungen an den auf Zug beanspruchten Stäben auf und die auftretenden Verformungen der Druckstäbe sind analog zur ersten Variante verschwindend gering.

Die Verformung des Gesamtsystems, betrachtet am Ober- und Untergurt, befindet sich ebenfalls innerhalb der zulässigen Grenzen und wird zu Vergleichszwecken mit den vorgespannten Varianten genauer betrachtet.

4.3.2.3 Variante 3 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Aufgrund der Baugleichheit gelten die bereits bei der Variante 2 (Kap. 4.3.2.2) durchgeführten Nachweise zur Gebrauchstauglichkeit für die in Kapitel 4.3.1.3 bzw. 4.3.1.2 ausgewählten Stäbe und das Gesamtsystem.

4.3.2.4 Variante 4 – Nicht vorgespanntes Stabtragwerk

Die Gebrauchstauglichkeitsnachweise der Varianten 1 bis 3 ergaben für die einzelnen Tragwerksstäbe bereits sehr geringe bis gar keine Auslastungen und werden somit an dieser Stelle vernachlässigt. An dieser Stelle wird daher nur der Ober- und Untergurt betrachtet bzw. nachgewiesen.

Verformungsnachweis der Stabzüge

$$NW: \frac{f_{vorh}}{f_{zul}} \leq 1,0$$

- Obergurt:

$$NW: \frac{22,79 \text{ cm}}{6000 \text{ cm}/300} = 1,14 > 1,0$$

(→ vorhandene Durchbiegung = l/263,3)

- Untergurt:

$$NW: \frac{14,3 \text{ cm}}{4800 \text{ cm}/300} = 0,89 < 1,0$$

Die vorhandene Durchbiegung des Obergurtes ist mit l/263,3 geringfügig außerhalb der Vorgabe, aber dennoch für eine reine Stahlkonstruktion unbedenklich. Für Stahlkonstruktionen, wie z.B. ein Kranbahnträger wären solche Werte natürlich unzulässig. Des weiteren variieren die zulässigen Grenzwerte für Konstruktionen aus Stahl oder aus mehreren Werkstoffen (z.B. aus Glas und Stahl), was hier allerdings nicht zutrifft, gemäß ihrer Einsatzzwecke.

4.3.2.5 Variante 1 – Vorspanntes Stabtragwerk

Ein Nachweis über die Gebrauchstauglichkeit ist natürlich auch für die vorgespannte Tragwerksvariante 1 zu führen. Hierbei soll es weniger um die Verdeutlichung des Nachweises gehen, sondern eher die Auswirkung der Vorspannung auf das Gesamtsystem erkannt werden.

Verformungsnachweis der Tragwerksstäbe und Stabzüge

$$NW: \frac{f_{vorh}}{f_{zul}} \leq 1,0$$

- Stab Nr. 1:

$$NW: \frac{0,15 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,08 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 5:

$$NW: \frac{0,16 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,08 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 17:

$$NW: \frac{0,19 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,10 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 22:

$$NW: \frac{0,00 \text{ cm}}{671 \text{ cm}/300} = 0,00 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 23:

$$NW: \frac{0,00 \text{ cm}}{671 \text{ cm}/300} = 0,00 \ll 1,0$$

- Obergurt:

$$NW: \frac{7,34 \text{ cm}}{5400 \text{ cm}/300} = 0,41 < 1,0$$

- Untergurt:

$$NW: \frac{8,09 \text{ cm}}{6000 \text{ cm}/300} = 0,40 < 1,0$$

Der Verformungsnachweis des Gesamtsystems sowie der ausgewählten Stäbe ist auch bei der vorgespannten Variante 1 erfüllt, da alle Verformungen sich im Bereich

der zulässigen Grenzen befinden. Da trotz der Vorspannung die Stäbe Nr. 22 & 23 weiterhin als Zugstäbe fungieren treten erneut keine Verformungen senkrecht zur Stabrichtungsachse auf. Die Verformung bzw. Durchbiegung der Gesamtkonstruktion konnte hingegen durch die Vorspannung erheblich reduziert werden.

4.3.2.6 Variante 2 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Auch für die vorgespannte Version der Variante 2 ist ein Gebrauchstauglichkeitsnachweis zu führen, welcher u.a. eine Auswirkung der Vorspannung für das Gesamtsystem verdeutlichen soll. Die Anzahl der Nachweise soll dabei nur zur besseren Verdeutlichung der Vergleiche dienen.

Verformungsnachweis der Tragwerksstäbe und Stabzüge

$$NW: \frac{f_{vorh}}{f_{zul}} \leq 1,0$$

- Stab Nr. 5:

$$NW: \frac{0,27 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,14 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 14:

$$NW: \frac{0,28 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,14 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 19:

$$NW: \frac{0,30 \text{ cm}}{848 \text{ cm}/300} = 0,15 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 21:

$$NW: \frac{0,04 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,02 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 24:

$$NW: \frac{0,00 \text{ cm}}{848 \text{ cm}/300} = 0,00 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 25:

$$NW: \frac{0,04 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,02 \ll 1,0$$

- Stab Nr. 29:

$$NW: \frac{0,02 \text{ cm}}{600 \text{ cm}/300} = 0,01 \ll 1,0$$

- Obergurt:

$$NW: \frac{10,34 \text{ cm}}{6000 \text{ cm}/300} = 0,52 < 1,0$$

- Untergurt:

$$NW: \frac{8,90 \text{ cm}}{4800 \text{ cm}/300} = 0,55 < 1,0$$

Die Verformungsnachweise, anhand der auftretenden Durchbiegungen bzw. Verformungen, der einzelnen Stäbe sowie des Ober- und Untergurtes des Gesamtsystems gelten auch bei der vorgespannten Variante 2 als erbracht.

Auch bei dieser Tragstruktur liegen alle Verformungen innerhalb der zulässigen Grenzen, Verformungen an den auf Druck beanspruchten Stäben sind verschwindend gering und an den Zugstäben nicht vorhanden. Die Verformung des Gesamtsystems hat sich ähnlich wie bei der ersten Variante durch den Einsatz einer externen Vorspannung deutlich verringert.

Als erste und sehr deutliche Erkenntnis lässt sich somit festhalten, dass das Vorspannen von Tragwerken einen erheblichen Einfluss auf die Verformungseigenschaften haben kann. Diese Eigenschaft könnte man sich zum Beispiel bei stützenfreien Konstruktionen mit relativ großer Spannweite zu Nutze machen.

4.3.2.7 Variante 3 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Da bereits in Kapitel 4.3.2.6 eine sehr geringe Auslastung der Stäbe hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit zu erkennen war, werden diese Nachweise vernachlässigt. Viel interessanter dürfte der Einfluss des geänderten Spanngliedverlaufes auf die Durchbiegung sein.

Verformungsnachweis der Stabzüge

$$NW: \frac{f_{vorh}}{f_{zul}} \leq 1,0$$

- Obergurt:

$$NW: \frac{11,40 \text{ cm}}{6000 \text{ cm}/300} = 0,57 < 1,0$$

- Untergurt:

$$NW: \frac{9,25 \text{ cm}}{4800 \text{ cm}/300} = 0,58 < 1,0$$

Im direkten Vergleich zur, bis auf den Verlauf der Spannelemente, baugleichen Variante 2 (vorgespannt) ist somit folgendes sofort zu erkennen:

- Durchbiegung Obergurt Variante 2: 10,34cm → l/580,3
- Durchbiegung Obergurt Variante 3: 11,40cm → l/526,4
- Durchbiegung Untergurt Variante 2: 8,90cm → l/539,4
- Durchbiegung Untergurt Variante 3: 9,25cm → l/518,9

Der Nachweis der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit fällt somit knapp zugunsten der Variante 2 mit durchgehendem Verlauf der Spannelemente entlang des Untergurtes aus. Dies ist eine weitere Erkenntnis für einen Einsatz externer Vorspannungen an Stahlkonstruktionen.

4.3.2.8 Variante 4 – Vorgespanntes Stabtragwerk

Wie bereits festgestellt führt ein Nachweis der Zugstäbe zu keiner und ein Nachweis der auf Druck belasteten Einzelstäbe nur zu einer sehr geringen Auslastung. Wie bereits bei den vorangegangenen Varianten praktiziert, wird sich erneut auf die Nachweise zum Ober- bzw. Untergurt beschränkt. Dabei soll aber diesmal weniger der Vergleich der Varianten 4 untereinander im Vordergrund stehen, da sie konstruktiv bei den gewählten Querschnittprofilen stark voneinander abweichen.

Verformungsnachweis der Stabzüge

$$NW: \frac{f_{vorh}}{f_{zul}} \leq 1,0$$

- Obergurt:

$$NW: \frac{20,30 \text{ cm}}{6000 \text{ cm} / 300} = 1,01 \sim 1,0$$

- Untergurt:

$$NW: \frac{14,04 \text{ cm}}{4800 \text{ cm} / 300} = 0,88 < 1,0$$

Die Durchbiegung der Gesamtkonstruktion weist eine ähnliche Tendenz wie die dazugehörige nicht vorgespannte Variante auf. Wie bereits erwähnt kann dies allerdings nicht direkt mit der Vorspannung in Verbindung gebracht werden, da hier keine strukturgleichen Varianten miteinander verglichen werden. Trotzdem sollte man den positiven Einfluss einer Vorspannung, gegenüber einer herkömmlichen Konstruktion, kapitelabschließend an dieser Stelle noch einmal hervorheben.

4.3.3 Sonstige Nachweise

Im Abschnitt „sonstige Nachweise“ werden kurz weitere Nachweise erwähnt, welche während einer Tragwerksplanung zu führen sind, aber für die Aussagefähigkeit dieser Abschlussarbeit irrelevant sind und teilweise vernachlässigt werden.

Ein Punkt wären dabei die Nachweise zu den Knotenanschlüssen, wie z.B. den Nachweis der Schraubverbindungen auf Abscheren oder Lochleibung, den Nachweis der Knotenblechspannungen oder den Nachweis der Schweißnahtspannungen. Zu beachten und zu vermeiden sind dabei immer Anschlüsse mit sogenannten „Fehlhebeln“ oder „Außermittigkeiten“.

Eine weiterer Punkt wären die Nachweise für örtliches (Knotenpunkte, Auflagerpunkte u.s.w.) Stabilitätsversagen (Plattenbeulen), welches speziell bei zunehmenden Trägerhöhen und Blechschlankheiten ein leicht zu unterschätzendes Problem darstellen kann.

Der unter Abschnitt 4.3.3.1 aufgeführte „Gestaltsfestigkeitsnachweis“ ist ein Wanddickennachweis für Hohlprofile im Knotenbereich. Er weist die Lasteinleitung und Beulgefahr im Knotenbereich nach und unterscheidet sich daher von den hier bisher genannten Nachweisen. Da die Variante 4 ein materialoptimiertes Tragwerk ist, welches sich aus Hohlprofilen zusammensetzt, wird dieser Nachweis für ausgewählte Knotenpunkte (der nicht vorgespannten Version) nachfolgend, zur Verdeutlichung, geführt.

4.3.3.1 Gestaltsfestigkeitsnachweis für Hohlprofile |15|

Ein Gestaltsfestigkeitsnachweis berücksichtigt örtliche Lasteinleitungen und somit die lokalen Beanspruchungen/Spannungen um eventuelle Stabilitätsprobleme, wie z.B. eine Beulgefahr, beurteilen oder ausschließen zu können.

Wie bereits erwähnt haben Hohlprofile zwar den Vorteil das die einzelnen Stäbe bessere Stabilitätseigenschaften besitzen, da das Problem mit der schwachen Achse nicht wie bei offenen Profilen auftritt, aber trotzdem müssen bestimmte Profilabmessungen eingehalten werden.

Bedingungen: $\text{vorh } \frac{t_1}{t_2} \geq \text{erf } \frac{t_1}{t_2}$

$$\gamma = \frac{b_2}{b_1} \geq 0,35$$

$$\frac{b}{t} \leq 43 \text{ (S235); } 36 \text{ (S355)}$$

$$t \geq 1,5 \text{ mm}$$

$$t \leq 30 \text{ mm (S235)}$$

$$t \leq 25 \text{ mm (S355)}$$

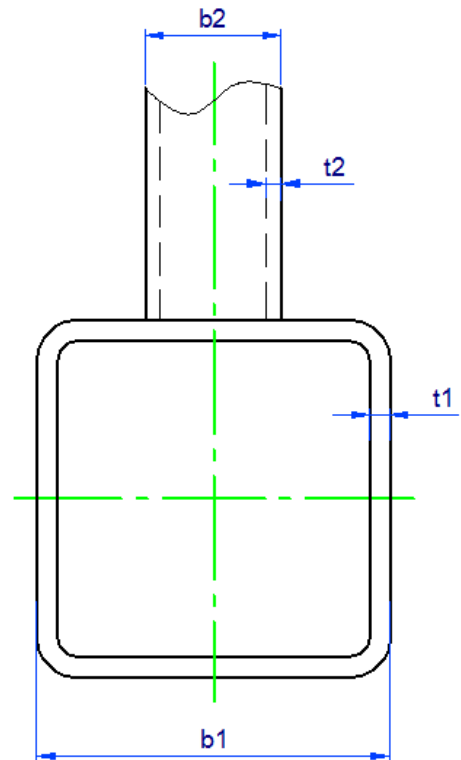


Abbildung 4.3.3.1.1 Profilabmessungen
beim Wanddickennachweis

Tragwerkstäbe aus Hohlprofilen werden i.d.R. direkt miteinander verbunden, so dass es zu Unterscheidungen hinsichtlich der Überlappung bei Knoten aus mehr als zwei Stäben kommt. Knoten mit einer Überlappung haben durch die eingeschränkte Schweißzugänglichkeit einen höheren Fertigungsaufwand, allerdings werden hierbei Kräfte günstiger in den „Obergurt“ eingeleitet. Bei Knoten ohne Überlappung, auch „Knoten mit Spalt“ genannt, wirkt sich die bessere Zugänglichkeit ungünstig auf den Spannungsverlauf (wechselnd, siehe Abb. 4.3.3.1.2) im „Obergurt“ aus.

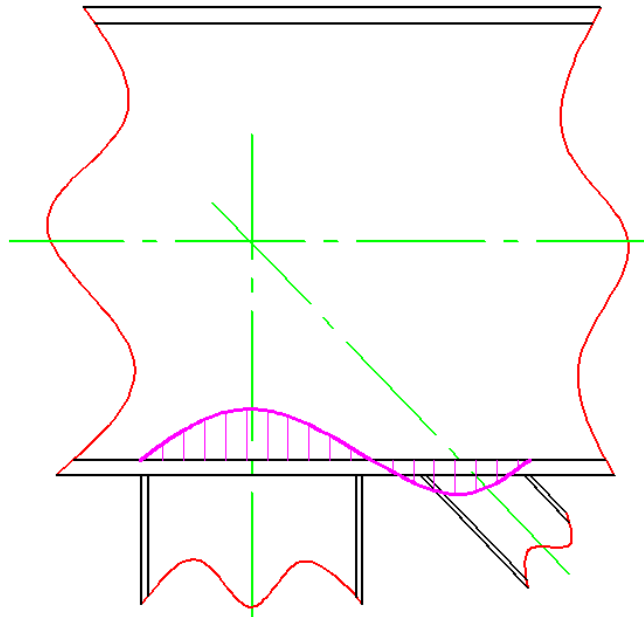


Abbildung 4.3.3.1.2 wechselnder Spannungsverlauf bei einem Knoten mit Spalt

Nachweis der Gestaltsfestigkeit (Wanddickennachweis) für ausgewählte Knotenpunkte der nicht vorgespannten Tragwerksvariante 4:

- Knoten 2:

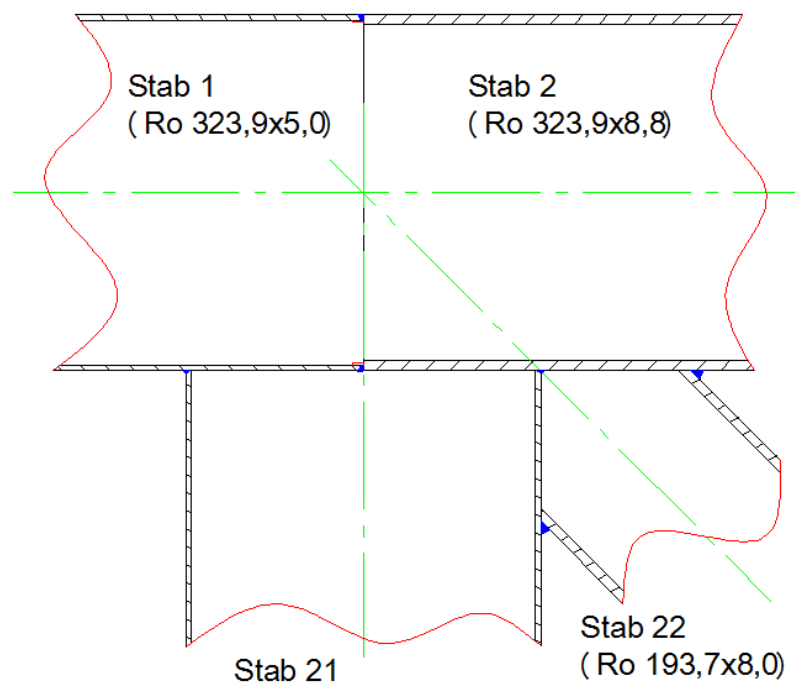


Abbildung 4.3.3.1.3 Knoten 2 ohne Spalt (überlappend)

$$erf \frac{t_1}{t_2} = 1,6 \text{ (S235; Knoten ohne Spalt bzw. mit Überlappung)}$$

- Pfosten auf Obergurt:

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{5,0 \text{ mm}}{5,0 \text{ mm}} = 1,0 < 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis nicht erbracht

Da geringere Spannungen zu Wanddickenabminderungen führen, kann anstatt „t2“ die reduzierte Wanddicke „red_t“ verwendet werden.

$$red_t = t_{stab} \times \frac{\sigma_{vorh}}{\sigma_{Rd}} = t_{stab} \times \frac{N_d/A}{\sigma_{Rd}}$$

$$red_t = 5,0 \text{ mm} \times \frac{949,9 \text{ kN} / 50,09 \text{ cm}^2}{21,82 \text{ kN} / \text{cm}^2} = 4,34 \text{ mm}$$

$$vorh \frac{t_1}{red_t} = \frac{5,0 \text{ mm}}{4,34 \text{ mm}} = 1,15 < 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis nicht erbracht

Da auch eine Reduzierung der Wanddicke keinen ausreichenden Erfolg brachte muss nun nach einer konstruktiven Lösung gesucht werden. Die einfachste wäre eine Verlängerung des Stabes Nr. 2 über den Anschlussbereich hinaus.

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{8,8 \text{ mm}}{5,0 \text{ mm}} = 1,76 > 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis erbracht

- Diagonale auf Obergurt:

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{8,8 \text{ mm}}{8,0 \text{ mm}} = 1,1 < 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis nicht erbracht

Da die Zugstäbe hinsichtlich ihrer Spannungsausnutzung optimiert worden, ist eine Wanddickenabminderung hier leider nicht möglich. So muss auch hier nach einer konstruktiven Lösung gesucht werden. Eine relativ einfache und gängige Möglichkeit wäre das Verstärken der

Wanddicke am Obergurt durch das Aufsetzen einer zusätzlichen Blechplatte z.B von 4mm. Diese muss allerdings großflächig mit dem Obergurt verbunden sein um ein „Abschälen“ zu verhindern.

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{12,8 \text{ mm}}{8,0 \text{ mm}} = 1,6 = 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis erbracht

- Diagonale auf Pfosten:

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{5,0 \text{ mm}}{8,0 \text{ mm}} = 0,63 < 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis nicht erbracht

Da die Druckstäbe (Pfosten) hinsichtlich ihrer Beanspruchung konzipiert worden, ist nur eine relativ geringe Wanddicke vorhanden, eine Waddickenabminderung der Zugstäbe ist erneut nicht möglich. Zum Verstärken der Wanddicke kommt auch hier ein aufgesetztes Blech (8mm) zum Einsatz.

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{13,0 \text{ mm}}{8,0 \text{ mm}} = 1,63 \approx 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis erbracht

- Knoten 5:

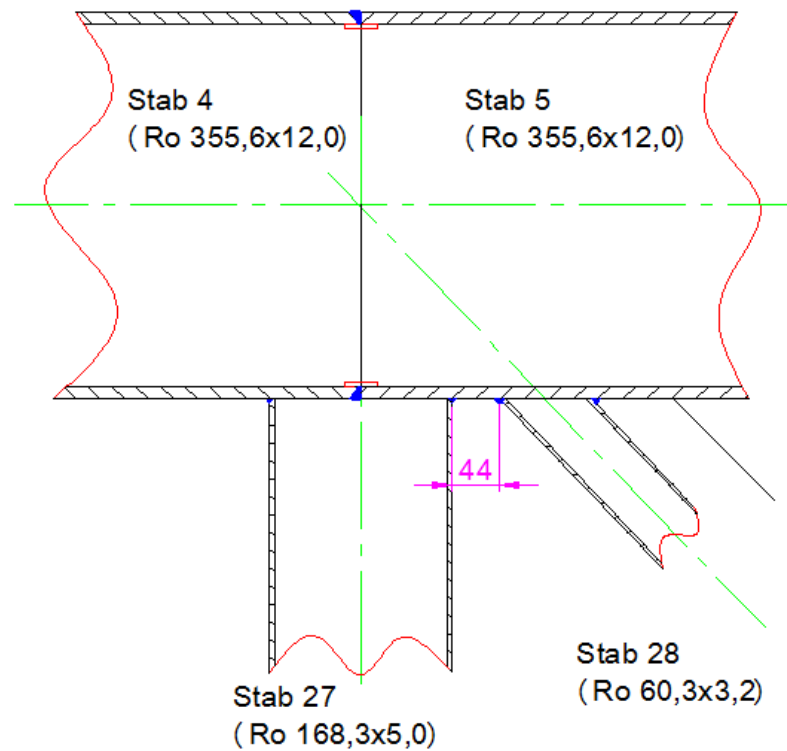


Abbildung 4.3.3.1.4 Knoten 5 mit Spalt

$$\frac{g}{b1} = \frac{44 \text{ mm}}{355,6 \text{ mm}} = 0,12 < 0,2$$

$$\text{erf} \frac{t1}{t2} = 1,6 + \frac{g}{b1} \times \left[5 \times \text{erf} \left(\frac{t1}{t2} \right)_4 - 8 \right]$$

(S235; Knoten ohne Überlappung)

$\text{erf} \left(\frac{t1}{t2} \right)_4$ ist das erforderliche Wanddickenv. nach Spalte 4, Tab. 4 DIN 18808

- Pfosten (Druckstab) auf Obergurt (Druckstab):

$$\frac{b1}{t1} = \frac{355,6}{12,0} = 0,29,63 \rightarrow \text{Bild Nr. 7}$$

$$\gamma = \frac{b2}{b1} = \frac{168,3}{355,6} = 0,47 > 0,35$$

$$\rightarrow \text{erf} \left(\frac{t1}{t2} \right)_4 \approx 4,0$$

$$\text{erf} \frac{t1}{t2} = 1,6 + \frac{44 \text{ mm}}{355,6 \text{ mm}} \times [5 \times 4,0 - 8] = 3,08$$

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{12,0 \text{ mm}}{5,0 \text{ mm}} = 2,4 < 3,08 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis nicht erbracht

Da geringere Spannungen zu Waddickenabminderungen führen, kann anstatt „ t_2 “ die reduzierte Waddicke „ red_t “ verwendet werden.

$$red_t = 5,0 \text{ mm} \times \frac{310,68 \text{ kN} / 25,65 \text{ cm}^2}{21,82 \text{ kN} / \text{cm}^2} = 2,78 \text{ mm}$$

$$vorh \frac{t_1}{red_t} = \frac{12,0 \text{ mm}}{2,78 \text{ mm}} = 4,31 > 3,08 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis erbracht

- Diagonale (Zugstab) auf Obergurt (Druckstab):

$$\frac{b_1}{t_1} = \frac{355,6}{12,0} = 0,29,63 \rightarrow \text{Bild Nr. 7}$$

$$\gamma = \frac{b_2}{b_1} = \frac{60,3}{355,6} = 0,17 < 0,35$$

Wenn $erf \frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{\gamma}$ ist, darf $\gamma < 0,35$ sein, d. h.:

$$erf \frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{0,17} = 5,88$$

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{12,0 \text{ mm}}{3,2 \text{ mm}} = 3,75 < 5,88 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis nicht erbracht

$$red_t = 3,2 \text{ mm} \times \frac{115,09 \text{ kN} / 5,74 \text{ cm}^2}{21,82 \text{ kN} / \text{cm}^2} = 2,93 \text{ mm}$$

$$vorh \frac{t_1}{red_t} = \frac{12,0 \text{ mm}}{2,93 \text{ mm}} = 4,10 < 5,88 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis nicht erbracht

Da auch hier die Wanddickennachweise nicht erfüllt worden sind, ist eine Verstärkung der Wandstärke (Blech = 6mm) auszuführen.

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{18,0 \text{ mm}}{2,93 \text{ mm}} = 6,14 > 5,88 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis erbracht

- Knoten 15:

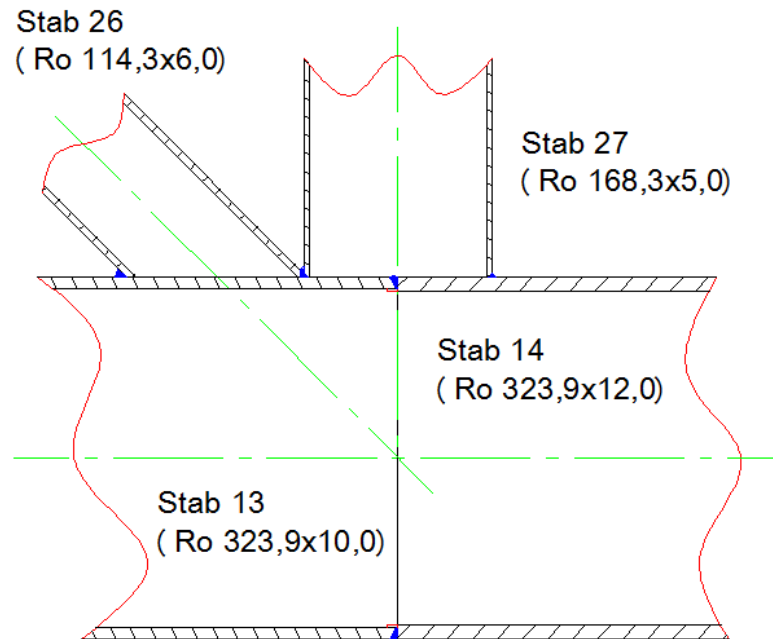


Abbildung 4.3.3.1.5 Knoten 15 ohne Spalt (nicht überlappend)

$$erf \frac{t_1}{t_2} = 1,6 \text{ (S235; Knoten ohne Spalt)}$$

- Pfosten auf Untergurt:

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{10,0 \text{ mm}}{5,0 \text{ mm}} = 2,0 > 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis erbracht

- Diagonale auf Obergurt:

$$vorh \frac{t_1}{t_2} = \frac{10,0 \text{ mm}}{6,0 \text{ mm}} = 1,66 > 1,6 = erf \frac{t_1}{t_2}$$

→ Nachweis erbracht

5.0 Variantenvergleich

In Kapitel 5 werden nun die verschiedenen Tragwerksausführungen genauer betrachtet und miteinander verglichen. Die direkten Vergleiche finden dabei hauptsächlich mit den jeweils baugleichen Tragwerken statt.

Die unterschiedlichen Tragwerksysteme wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln generiert, bemessen und hinsichtlich ihrer Grenzzustände nachgewiesen. Bei der Ausführung 1 handelt es sich um die nicht vorgespannten Tragwerke und bei der Ausführung 2 um die jeweils baugleichen vorgespannten Tragwerke. Es sollen dabei sowohl die konstruktiven bzw. gestalterischen wie auch wirtschaftlichen Aspekte bis hin zu den direkten Auswirkungen auf das Tragverhalten betrachtet werden. Da Tragwerksplaner, Fertiger und Monteure die genannten Aspekte als unterschiedlich wichtig betrachten, kann man über die Gewichtung der einzelnen Punkte sicherlich streiten. In den folgenden Abschnitten werden einige Punkte an den Tragwerksmodellen neutral analysiert.

Dieser Vergleich hat somit vielmehr die Zielsetzung, zu ermitteln bzw. darzustellen, ob bei einem Einsatz einer externen Vorspannung Kosten verringert und Nutzen gesteigert werden kann.

5.1 Vergleichskriterien

Als aussagefähigste Vergleichskriterien für direkte Vergleiche der Tragwerke und deren Varianten werden für diese Diplomarbeit die Konstruktivität, die Wirtschaftlichkeit und das Tragverhalten angesehen.

Es werden dabei verschiedene Aspekte wie z.B. Bemessungs- und Herstellungsaufwand der jeweiligen Varianten gegenübergestellt mit dem Ziel Unterschiede sowie Vor- und Nachteile zu durchleuchten. Ein Vergleich durch einzelne Vergleichskriterien bzw. Aspekte kann bei der Entscheidungsfindung hilfreich sein, muss aber immer im Zusammenspiel mehrerer Vergleichskriterien betrachtet werden. Diese Vergleichskriterien stehen dabei nicht selten im direkten Zusammenhang zueinander, da z.B. die konstruktive Gestaltung direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion hat.

Hauptsächlich sollen dabei die Auswirkungen der Spanngliedführung (mit oder ohne Umlenkung) bzw. des Spanngliedverlaufes (Obergurt / Untergurt) und der Effekt einer Materialersparnis (mit oder ohne Vorspannung) betrachtet werden.

5.1.1 Vergleich unter dem Aspekt der Konstruktivität

Eine Gegenüberstellung der vorgespannten und nicht vorgespannten Ausführungen hinsichtlich ihrer Konstruktivität kann übersprungen werden, da diese zur besseren Vergleichbarkeit jeweils baugleich ausgeführt worden sind.

Wie bereits angedeutet, kann man sich beim Vergleich nicht allein auf die konstruktive Sichtweise beschränken, sondern muss zur Entscheidungsfindung weiter denken. Obwohl die Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion immer eng mit der konstruktiven Ausführung verknüpft ist, werden in dieser Diplomarbeit weniger die verschiedenen Varianten sondern vielmehr die jeweils „baugleichen“ Konstruktionen miteinander verglichen.

Um hinsichtlich der Konstruktivität eine bessere Vergleichbarkeit erzielen zu können sind die einzelnen Varianten mit identischen Querschnittsprofilen generiert worden. Durch die Wahl gleicher Querschnittsprofile würde sich theoretisch auch der Unterschied hinsichtlich Planungs- und Fertigungsaufwand minimieren. In der Realität muss aus konstruktiver Sicht aber festgehalten werden, dass die nicht vorgespannte Ausführung immer der vorgespannten Ausführung vorzuziehen ist. Eine externe Vorspannung bedeutet immer konstruktiven Mehraufwand in der Planung bzw. Konstruktion und der Fertigung sowie Montage.

Den größten Anteil dafür tragen sicherlich die unbedingt notwendigen Spannstellen sowie eventuell benötigte Umlenkstellen. Wenn man „eventuell“ schreibt so müsste man dies natürlich kurz näher erläutern.

Vergleicht man die vorgespannte Variante 2 mit der „baugleichen“ und ebenfalls vorgespannten Variante 3 hinsichtlich ihrer Konstruktivität, so stellt man fest das ein Umlenken der Spannelemente durchaus entfallen kann. Da ein Verlegen der Spannstellen von den Auflagerpunkten zu den Umlenkpunkten realisierbar ist und dies eine aufwendige Konstruktion der Umlenkstellen überflüssig macht sollte immer ein geradliniger Verlauf der Spannelemente angestrebt werden. Welche Auswirkungen dies auf das Tragverhalten hat, wurde bereits erwähnt.

5.1.2 Vergleich unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit

In diesem Kapitel soll nun die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten näher betrachtet werden. Ein Vergleich bezüglich der Wirtschaftlichkeit ist aber eigentlich erst aussagekräftig und interessant, wenn man den Effekt der Querschnitts- und Materialreduzierung aufgrund der Vorspannung miteinbeziehen kann.

Beim Vergleich kommt es dabei in erster Linie auf das Gesamtgewicht der Konstruktion bzw. die Summe aller Einzelstäbe und Aufbauten an. Die Fertigungskosten, für eine gewöhnliche Stabstahlkonstruktion, welche sich aus den Planungskosten, Materialkosten, Beschichtungs- und Montagekosten zusammensetzen, liegen zur Zeit bei ca. 2,45 EUR/kg [13].

Die Kosten der Vorspannung sind bei der reinen Stabkonstruktion noch zu vernachlässigen und fließen ausschließlich bei den vorgespannten Varianten ein. Sie belaufen sich, laut dem marktführenden Vertreiber von Spannsystemen dieser Art, zur Zeit durchschnittlich auf 3,30 EUR/kg. Dieser Wert ist annähernd konstant da mit zunehmender Einsatzlänge bzw. –masse, der Montageaufwand ebenfalls relativ konstant zunimmt. Somit verhalten sich die Kosten je Kilogramm bei einer Vorspannung, egal ob 20m oder 100m, ziemlich gleichbleibend.

Die Masse der Vorspannung, für das ausgewählte System „EX-36“, liegt laut bauaufsichtlicher Zulassung bei 10,88 kg/m pro Spannelement. Bei der, für den wirtschaftlichen Vergleich, ausschlaggebenden Variante 4 kommt nur ein Spannelement entlang des parallel verlaufenden Teil des Untergurtes zum Einsatz. Aus der Vorspannung resultieren somit folgende Massen und Kosten:

- Masse der Spannelemente = $10,88 \text{ kg/m} \times 48\text{m} = 522,24 \text{ kg}$
- Kalkulation zur Vorspannung = $522,24 \text{ kg} \times 3,30 \text{ EUR/kg} = 1.723,39 \text{ EUR}$

Bei einem Einsatz der in Kapitel 4.2.1.4 ermittelten Querschnitte würde sich für die nicht vorgespannte Tragkonstruktion eine Masse von ~11.980kg ergeben. Aus dieser Masse und aktuell durchschnittlichen Fertigungskosten von ca. 2,45 EUR/kg ergibt sich folgenden Kalkulation zur nicht vorgespannten Stahlkonstruktion:

- Kalkulation Stahlkonstruktion = $11.980 \text{ kg} \times 2,45 \text{ EUR/kg} = 29.351,- \text{ EUR}$

Auch für die vorgespannte Variante 4 bildet die Masse der Stahlkonstruktion die Kalkulationsgrundlage. Die in Kapitel 4.2.2.4 aufgeführten Querschnitte und die dazugehörigen Profillängen führen bei der reinen Stahlkonstruktion (ohne externe Spannelemente) zu einer Masse von ~10.110kg und folgenden Kosten:

- Kalkulation Stahlkonstruktion = $10.110 \text{ kg} \times 2,45 \text{ EUR/kg} = 24.769,50 \text{ EUR}$

	Variante 4	
	normal	vorgespannt
Masse Stahlbau	11.980 kg	10.110 kg
Kosten Stahlbau	2,45 EUR/kg	2,45 EUR/kg
Masse Vorspannung	<i>entfällt</i>	522,24 kg
Kosten Vorspannung	<i>entfällt</i>	3,30 EUR/kg
kalkulierte Kosten Gesamtkonstruktion	29.351 EUR	26.492,89 EUR

Eine Masseersparnis von ~1.870kg führt trotz den zusätzlichen Kosten für die Vorspannung zu einer Gesamtkostenreduzierung, bei der querschnittsoptimierten Tragwerksvariante, von knapp 3.000,-EUR und somit zu einer Ersparnis von ca. 10% je Fachwerkträger. Es muss daher festgehalten werden, dass sich durch eine zusätzliche Vorspannung durchaus eine Masseersparnis und somit eine Kostenreduzierung erzielen lässt. Dieser Effekt fällt allerdings bei jeder beliebigen Tragstruktur unterschiedlich groß aus, so dass es sich um keine allgemein gültige Aussage handeln kann.

5.1.3 Vergleich unter dem Aspekt des Tragverhalten

In diesem Kapitel sollen nun die Unterschiede, Vor- bzw. Nachteile aus einer Gegenüberstellung der nicht und vorgespannten Tragwerksvarianten erläutert werden. Der konstruktive Mehraufwand zur Realisierung ist bereits in Kapitel 5.1.1 als Nachteil aufgeführt worden. Dieser Nachteil kommt im Bereich der Spannstellen auch hinsichtlich des Tragverhaltens kurz zur Sprache, da diese Kraft bzw. die resultierenden Spannungen in das System eingeleitet werden müssen bzw. wirken. Im Speziellen bedeutet das zusätzliche Belastungen für das Tragverhalten der Verbindungs- bzw. Verankerungselemente.

Als positiver Effekt lässt sich die Reduzierung der Zugkräfte und der benötigten Querschnittsflächen entlang des Untergurtes. Es sollte dabei erwähnt werden, dass ein Einsatz der Vorspannung nur entlang der auf Zug beanspruchten Stäbe sinnvoll ist. Durch die frei wählbare Vorspannkraft lässt sich eine gleichmäßige Verteilung von Zug- und Druckkräften erzielen. Die Minimierung von Zugkräften bedeutet meistens immer eine Querschnittsreduzierung.

Bei einer Umkehrung zu Druckkräften lässt sich schon durch eine relativ geringe Querschnittsfläche, wenn diese relativ weit vom Schwerpunkt entfernt liegt, ein günstiges Knickverhalten der einzelnen Stäbe erzielen.

Ein weiterer positiver Effekt einer Vorspannung und der resultierenden Gewichtseinsparnis, ist die Verringerung der Durchbiegung bzw. der Gesamtverformung. Eine Verringerung der Durchbiegung kann auch Vergrößerung der Stützweiten bedeuten, was bei stützenfreien Konstruktionen mit begrenzten Tragwerkshöhen ein sehr positiver Effekt sein kann. Dabei ist zu beachten, dass die Größe dieses Effektes erneut stark von dem gewählten Verlauf der Spannelemente entlang der Konstruktion und der gewählten Vorspannkraft abhängig ist.

Neben positiven und negativen Effekten sollte man natürlich auch kurz auf Elemente eingehen, die nur einen sehr kleinen oder gar keinen direkten Effekt aus der Vorspannung erhalten. Im Speziellen handelt es sich dabei z.B. um die Knotenpunkte, vorausgesetzt die Vorspannung wird ohne Umlenkungen realisiert (Varianten 1, 3 & 4), und den Obergurt, vorausgesetzt die Vorspannung verläuft nicht entlang des Obergurtes (Varianten 2 bis 4).

6.0 Konstruktive Details

Heutzutage, in einer Zeit steigender Rohstoffpreise, wird eine tragende Konstruktion fast ausschließlich an ihrer Wirtschaftlichkeit gemessen. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln festgestellt, setzt sich die Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion hauptsächlich aus ihrem Material- und Fertigungsaufwand zusammen. Auf der einen Seite zählt also der Ausnutzungsgrad aller eingesetzten Stäbe bezüglich ihres Tragverhaltens und auf der anderen Seite die konstruktive Gestaltung der Tragkonstruktion.

Um ein wirtschaftliches Tragwerk generieren zu können, sollten daher die Ausführungen bestimmter Details der Konstruktion genau geplant und durchkalkuliert werden. Hierzu zählen in erster Linie die konstruktive Gestaltung der Knotenpunkte, die gewählten Stabquerschnitte und die Ausführung der Auflagerpunkte.

In diesem Kapitel bzw. in den folgenden Abschnitten sollen diesbezüglich einige Vorschläge und zu beachtende Hinweise aufgeführt werden. Da die konstruktive Gestaltung der Knotenpunkte und die Auswahl der Querschnitte, hinsichtlich der

Wirtschaftlichkeit einer Tragkonstruktion, den größten Anteil tragen, wird das Detail der Auflagerpunkte nur relativ kurz erwähnt.

6.1 Konstruktives Detail „Knotenpunkte“

Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit, sollte für jede Knotenpunktgestaltung eine unkomplizierte Konstruktion gewählt werden, welche sich am einfachsten durch simple Profilquerschnitte realisieren lässt. Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erwähnt, definiert sich die Wirtschaftlichkeit zu einem großen Teil durch den Fertigungsaufwand. Bezogen auf den Fertigungsaufwand spielt die Gestaltung der Anschluss- und Verbindungspunkte in einem Tragwerk eine tragende Rolle. Hierbei gibt es gravierende Unterschiede zwischen einem Tragwerk aus offenen und aus geschlossenen Profilquerschnitten.

Für offene Profilquerschnitte lässt sich relativ einfach eine verschraubbare Lösung durch z.B. Knotenbleche realisieren. Verzichtet man wie früher generell bzw. verstärkt auf Schweißnähte so vergrößert sich der Fertigungsaufwand enorm. Dies kann allerdings bei Minimierung der Schweißnähte im Anschlussbereich zu einer Optimierung des Kraftflusses führen, was auch wieder zu Vorteilen hinsichtlich der Langlebigkeit führt.

Nachfolgend sind ein paar Beispiele [14] für mehr oder weniger aufwendige Knotenpunkte dargestellt.



Abbildung 6.1.1 einfaches Beispiel für einen Knotenpunkt



Abbildung 6.1.2 aufwendiges Beispiel für einen Knotenpunkt

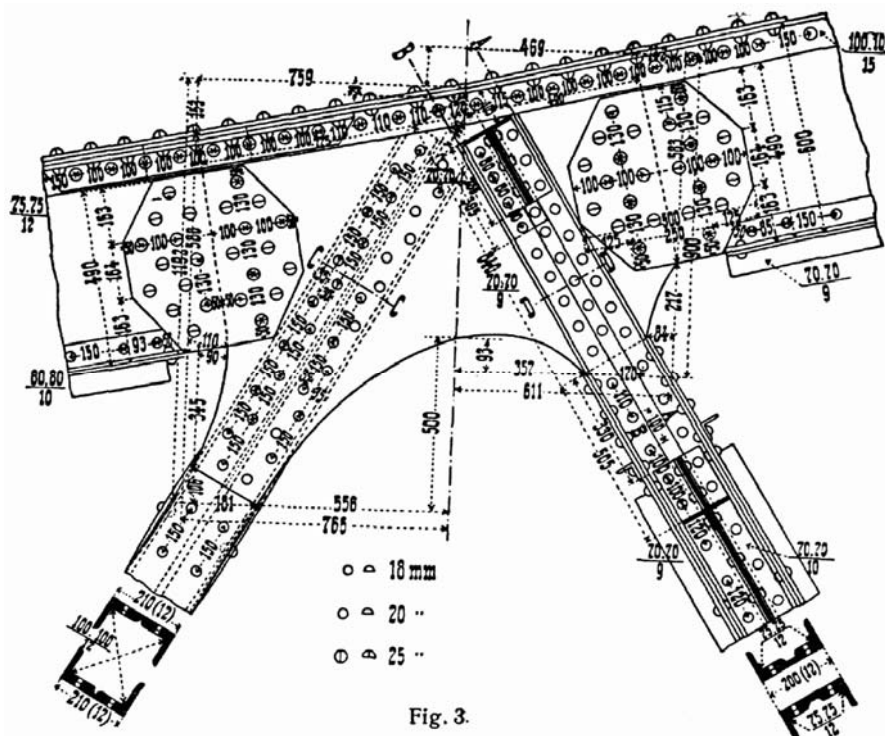


Abbildung 6.1.3 historisches Beispiel für einen Knotenpunkt

Knotenpunkte mit offenen Profilen sind somit aufgrund ihrer annähernd uneingeschränkten Zugänglichkeit mit Hilfe von ein paar Löchern und zusätzlichen Verbindungselementen zu realisieren. Ein weiterer großer Vorteil ist sicherlich die transportfreundliche Zerlegbarkeit der Gesamtkonstruktion, aber wo es Vorteile gibt

sind die Nachteile nicht weit, diese Nachteile der offenen Profilquerschnitte werden im nächsten Abschnitt 6.2 erläutert.

Wesentlich aufwendiger ist die Realisierung von Tragwerkknoten mit geschlossen Profilen. Da diese meistens nur durch Schweißnähte zu realisieren sind, ist ein großer Nachteil gleich offensichtlich, die Transportfreundlichkeit. Der Konstrukteur bzw. Tragwerksplaner hat dabei die Wahl zwischen möglichst großen, vorgefertigten Segmenten oder einer hohen Anzahl an Montageschweißnähten.

Weitere große Nachteile sind z.B. die eingeschränkte Zugänglichkeit, evtl. notwendige Ausklinkungen bei rotationssymmetrischen Querschnitten und die Realisierung kerbarmer Anschlüsse. Auch für Knotenpunkte mit geschlossenen Querschnitten sind nachfolgend noch Anschauungsbeispiele dargestellt.

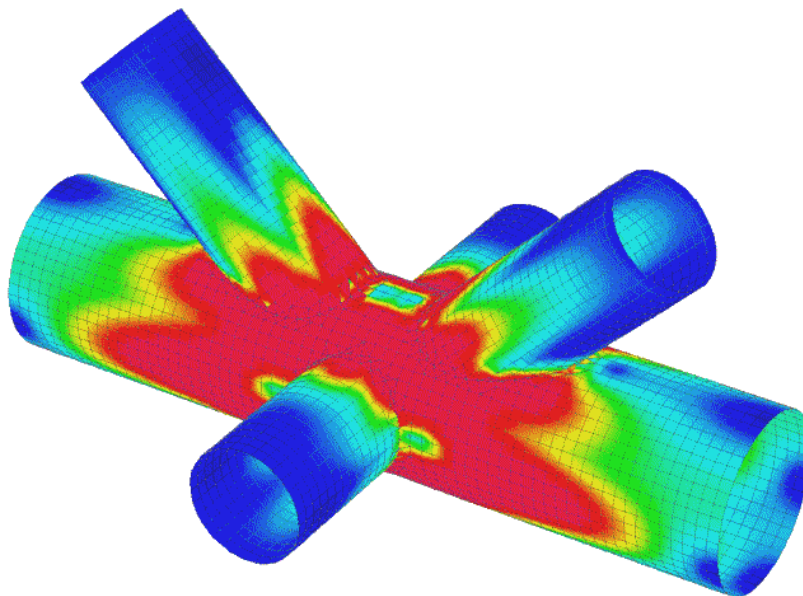


Abbildung 6.1.4 Beispiel für einen Rundrohrknotenpunkt



Abbildung 6.1.5 Beispiel für ein Rohrtragwerk

In den letzten Jahren ging der Trend in Richtung der Moderne, so dass sich zunehmend geschweißte Konstruktionen gegenüber den geschraubten Varianten durchsetzen. Die Meinung, dass sich altmodisch wirkende Schraubkonstruktionen architektonisch schwerer in ihrer Umgebung integrieren lassen verbreitet sich zunehmend unter Architekturstudenten. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit lässt sich allerdings keine allgemein gültige Aussage für oder gegen geschraubte oder geschweißte Knotenpunkte treffen.

Somit ist klar, dass dieser Aspekt immer situationsabhängig betrachtet werden muss. In der Praxis wird daher versucht mit einer Kombination beider Varianten die jeweiligen Vorteile zu nutzen und gleichzeitig gestalterische Vorgaben zu berücksichtigen.

6.2 Konstruktives Detail „Querschnitte“

Profilquerschnitte können in den verschiedensten Formen bzw. Abmessungen auftreten und eingesetzt werden. Grundlegend unterscheidet man dabei zwischen Walzprofilen und geschweißten Querschnitten. Hinsichtlich des Herstellungsaufwandes liegen dabei die Vorteile sicherlich auf der Seite der Walzprofile. Da diese aber durch ihre relativ großen Toleranzen im Auslieferungszustand stark in Höhe, Breite und Formtreue variieren können kommt es regelmäßig, auch bei den einfachsten Knotenausführungen, während der

Montage zu Problemen. Dies macht sich vor allem auch bei größeren Stückzahlen bemerkbar, trotz nur einer Herstellungs- bzw. Liefercharge.

Hinsichtlich der Formtreue liegt der Vorteil daher bei den geschweißten „Blechträgern“, da diese heutzutage in zum Teil vollständig automatisierten Prozessen ein große Wiederholungsgenauigkeit bieten. Des weiteren sind diese in fast allen Höhen, Breiten und Querschnittsfächen erzeugbar, wo hingegen die Profilhöhen und –breiten bei Walzprofilen stark begrenzt sind.

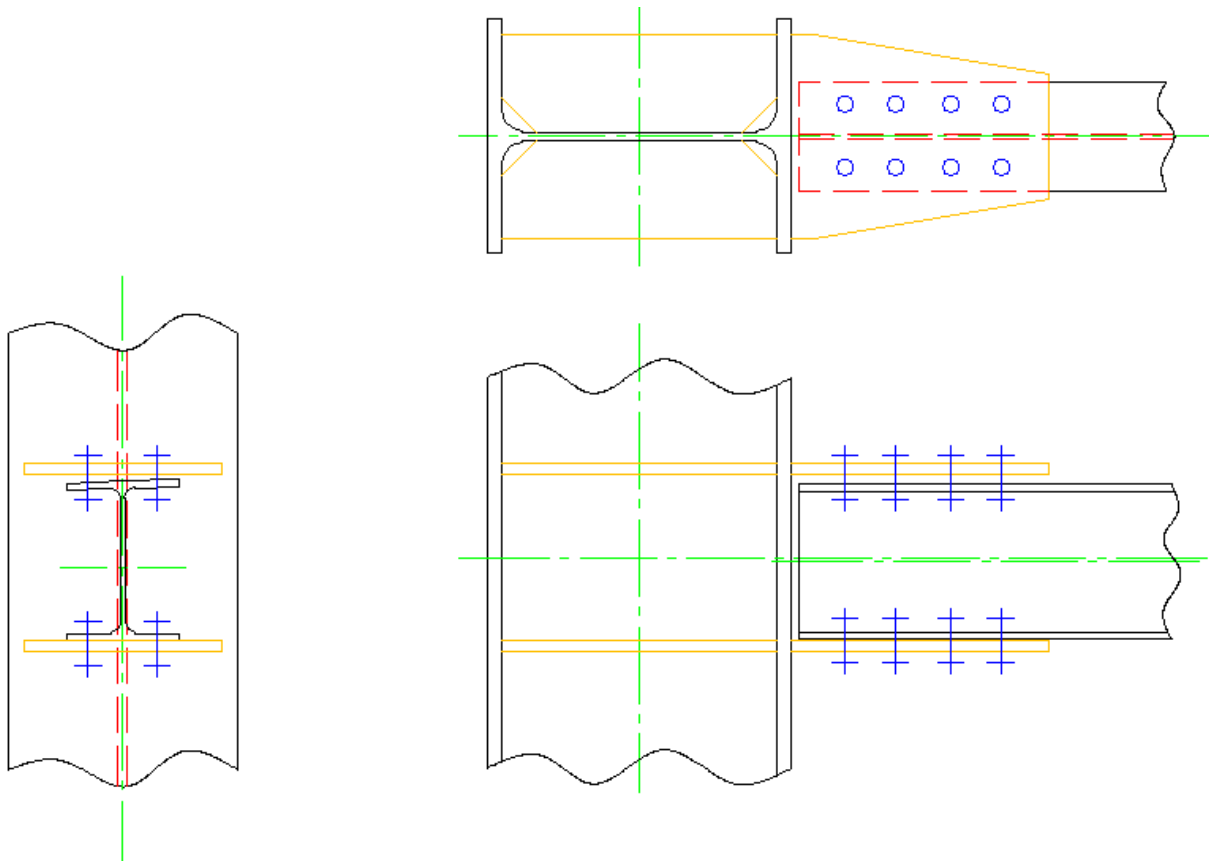


Abbildung 6.2.1 Beispielanschluss mit Walzprofilquerschnitten

Neben der ersten Klassifizierungsstufe gibt es aber noch eine weitere Unterteilung für Profilquerschnitte. Unabhängig ob Walz- oder Schweißquerschnitt wird eine Unterscheidung in offene, geschlossene, massive und den zusammengesetzten Querschnitten getroffen. Jeder dieser Querschnitte bietet entsprechend seinen Einsatzanforderungen dabei Vor- und Nachteile, welche zu einer zeitintensiveren Entscheidungsfindung führen sollten.

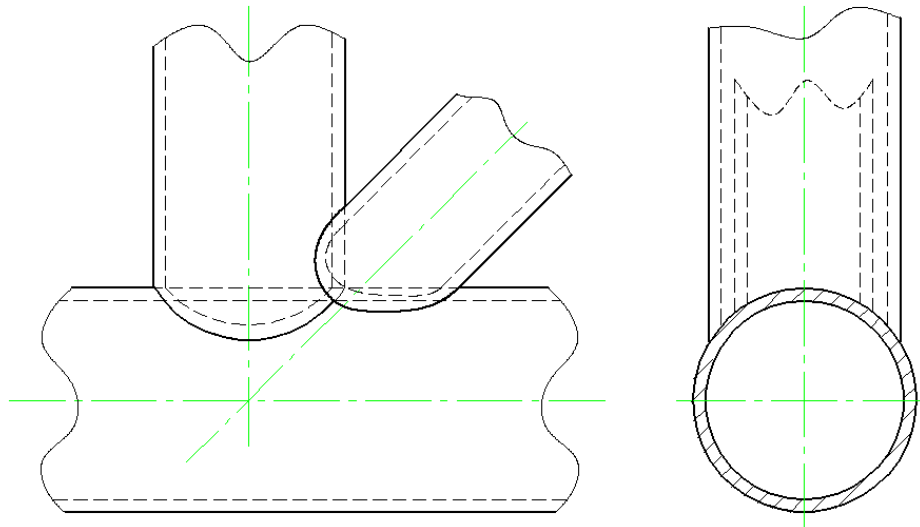


Abbildung 6.2.2 Beispielanschluss mit Hohlprofilen

Der Vorteil der Zugänglichkeit bei offenen Profilen wurde bereits erwähnt, hinzukommen die relativ geringen Beschaffungskosten bezogen auf die Masse und eine zeitnahe Verfügbarkeit. Doch die offenen Profile haben auch Schwächen, so z.B. gegenüber Torsionsbeanspruchungen in Querschnittsebene aufgrund der relativ hohen Verwölbungsanfälligkeit und Druckbeanspruchungen senkrecht zur Querschnittsfläche aufgrund der unterschiedlich großen Tragfähigkeiten senkrecht zu den Symmetrieachsen. Aufgrund ihrer symmetrischen, aber doch speziellen Form eignen sich offene Profilquerschnitte (z.B. I-förmig) somit eher bei Beanspruchungen für einachsige Biegung (hohe Biegesteifigkeit im Verhältnis zum Eigengewicht), in Richtung der Spiegelachse, als bei auf Druck beanspruchte Knickstäbe.

Geschlossene Profile sind nicht allein aufgrund ihrer besseren Knicksteifigkeit und geringeren Torsionsanfälligkeit von Vorteil, sondern erreichen dies auch mit einem wesentlich geringerem Materialeinsatz gegenüber den offenen Profilquerschnitten. Die größte positive Wirkung haben dabei kreisrunde Hohlprofile, da sie aufgrund ihrer rotationssymmetrischen Querschnittsform in jede beliebige Richtung, senkrecht zur Stabachse, die gleichen Widerstands- bzw. Trägheitsmomente aufweisen. Somit sind kreisrunde Querschnitte, hinsichtlich ihrer Einbaulage, planungs- und montagefreundlicher als unsymmetrische Profilquerschnitte. Diese Querschnitte werden bei, auf zentrischen Druck belasteten, Knickstäben am wirtschaftlichsten eingesetzt, da sie aufgrund ihrer Symmetrie und geschlossenen Form im Verhältnis zum Eigengewicht das größte Flächenträgheitsmoment aufweisen.

Einen weiteren, nicht gerade unwichtigen, Vorteil gegenüber den offenen Profilen bietet das Umströmungsverhalten, welches gerade bei Freilufttragwerken nicht zu unterschätzen ist.

Massive Querschnitte werden aufgrund ihres günstigen Fläche-Umfang-Verhältnisses und der Tatsache das bei Zugspannungen ausschließlich die Querschnittsfläche maßgebend ist, in Tragwerken am wirtschaftlichsten als Zugstäbe eingesetzt. Auch hier gibt es einen Vorteil der kreisrunden Massivquerschnitte, da diese sich neben dem Umströmungsverhalten auch mit geringeren Erzeugungskosten produzieren lassen.

Zusammengesetzte Profilquerschnitte dienen nur dem Zweck die Schwächen bzw. Stärken der einzelnen Profilformen zu beseitigen bzw. in einem zu vereinen. Dies lässt sich allerdings nur dann wirtschaftlich umsetzen, wenn die Richtungen der Belastungen klar zu definieren sind. Bei Tragwerken in Form eines Fachwerkträgers wird dies allerdings höchst selten, im Gegensatz zu Kranbahnträgern, angewendet.

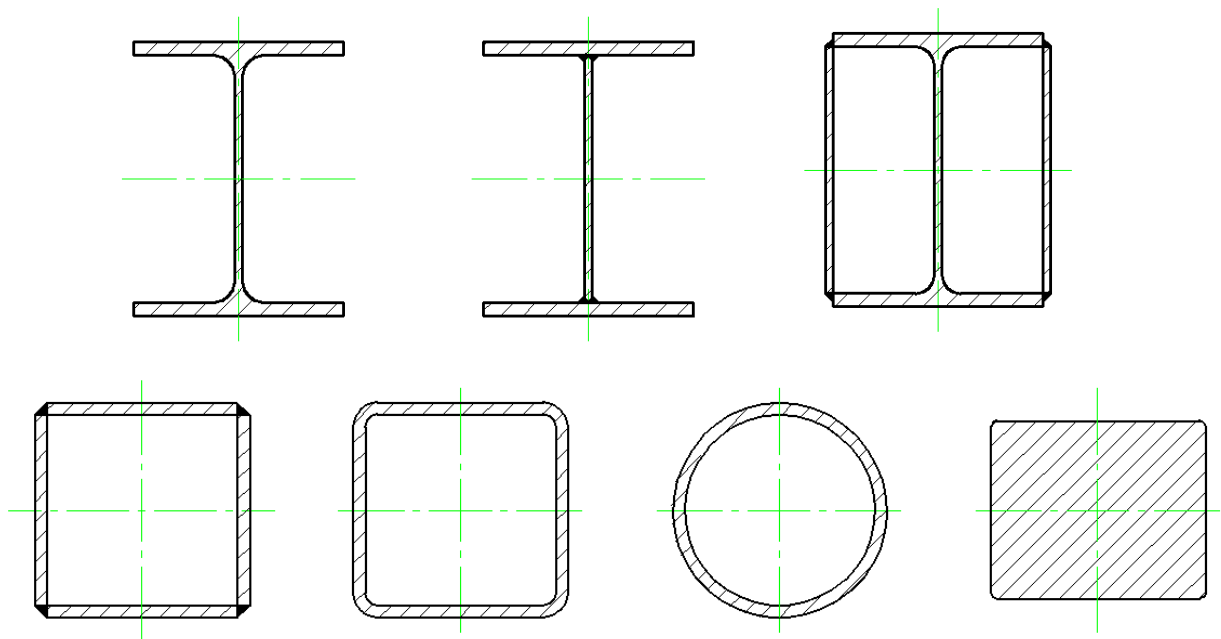


Abbildung 6.2.3 Beispiele für Profilquerschnitte

Gewalzte I-Profile (HEA & HEB)

Häufigster Einsatz bei Tragwerken:

- Biege- oder Durchlaufträger (bei einachsiger Biegung)
- Ober- und Untergurte bei räumlichen Tragwerken

Vorteile:

- gutes Gewicht-Tragfähigkeitsverhältnis
- sehr gute Verfügbarkeit aufgrund der Standardform
- günstiger Einsatz im standardisierten Systemstahlbau
- montagefreundliche Profilform

Nachteile:

- besitzen eine „schwache Querschnittsachse“ → Gefahr des Ausknickens
- große Maßtoleranzen behindern die Fertigungsgenauigkeit
- sehr begrenzte Fertigungsmöglichkeiten hinsichtlich Profilhöhe und –breite
- sehr industriell wirkende Erscheinungsform
- Korrosionsschutz/Stauwasser und offene Schmutzecken sind problematisch

Geschweißte I-Profile („Blechträger“, offene Profile)**Häufigster Einsatz bei Tragwerken:**

- Biege- oder Durchlaufträger (bei einachsiger Biegung)
- Ober- und Untergurte bei räumlichen Tragwerken

Vorteile:

- gutes Gewicht-Tragfähigkeitsverhältnis
- fast unbegrenzt in Profilhöhe und Breite variierbar
- die Profilform lässt sich der Belastung/Biegemomente anpassen
- hohe Reproduzierbarkeit und hohe Maßgenauigkeit
- günstiger Materialeinsatz durch einfachste Stahlbleche
- montagefreundliche Profilform erzeugbar

Nachteile:

- besitzen eine „schwächere Querschnittsachse“ → Gefahr des Ausknickens
- relativ hoher Fertigungsaufwand aufgrund der zusätzlichen Schweißnähte
- für eine wirtschaftliche Fertigung werden modernste Schweißanlagen (bevorzugt UP-Anlagen) und zusätzliches Fachpersonal benötigt
- sehr industriell wirkende Erscheinungsform
- Korrosionsschutz/Stauwasser und offene Schmutzecken sind problematisch

Hohlprofile (kreisrund, quadratisch & rechteckig)**Häufigster Einsatz bei Tragwerken:**

- Biege- oder Durchlaufträger (einachsige Biegung, rechteckige Hohlprofile)
- Zugstäbe (kreisrunde, quadratische und rechteckige Hohlprofile)
- Druckstäbe (kreisrunde und quadratische Hohlprofile)
- Ober- und Untergurte bei räumlichen Tragwerken

Vorteile:

- sehr gutes Verhalten gegenüber der Gefahr des Biegedrillknickens (offene Profilquerschnitte) trotz sehr geringem Eigengewicht
- sehr gutes Gewicht-Steifigkeitsverhältnis
- gutes Gewicht-Tragfähigkeitsverhältnis
- keine Schmutzkammerbildung durch geschlossenen Profilquerschnitt
- günstiges Umströmungsverhalten aufgrund der Profilform (kreisrund)

Nachteile:

- begrenzte Fertigungsmöglichkeiten hinsichtlich des Profildurchmessers
- bei zunehmendem Durchmesser nimmt der Fertigungsaufwand zu (Strangpressen/Ziehen, längsnahtgeschweißt & spiralnahtgeschweißt)
- steigender Produktionsaufwand bedeutet steigende Erzeugerpreise
- aufwendige Ausführung der Knoten und Anschlussbereiche

Geschweißte Hohlprofile als Kastenträger (quadratisch & rechteckig)**Häufigster Einsatz bei Tragwerken:**

- Biege- oder Durchlaufträger (einachsige Biegung, rechteckige Hohlprofile)
- Zug- und Druckstäbe
- Ober- und Untergurte bei räumlichen Tragwerken

Vorteile:

- sehr gutes Verhalten gegenüber der Gefahr des Biegedrillknickens (offene Profilquerschnitte) trotz sehr geringem Eigengewicht
- sehr gutes Gewicht-Steifigkeitsverhältnis
- gutes Gewicht-Tragfähigkeitsverhältnis
- keine Schmutzkammerbildung durch geschlossenen Profilquerschnitt
- die Profilform lässt sich der Belastung/Biegemomente anpassen
- hohe Reproduzierbarkeit und hohe Maßgenauigkeit

Nachteile:

- relativ hoher Fertigungsaufwand aufgrund der zusätzlichen Schweißnähte
- für eine wirtschaftliche Fertigung werden modernste Schweißanlagen (bevorzugt UP-Anlagen) und zusätzliches Fachpersonal benötigt
- aufwendige Ausführung der Knoten und Anschlussbereiche

Massive Profilquerschnitte**Häufigster Einsatz bei Tragwerken:**

- Zugstäbe
- Verstärkungen an zusammengesetzten Profilquerschnitten

Vorteile:

- sehr gutes Umfangs-Querschnittsflächenverhältnis
- durch die kompakte Form ideal als Zugstab
- geringer Platzbedarf im Verhältnis zur tragenden Querschnittsfläche
- montagefreundliche Profilform

Nachteile:

- besitzen eine geringe Tragfähigkeit gegenüber Biegung und Druck
- hohes Eigengewicht im Verhältnis zum Querschnittsumfang
- eingeschränkte Verfügbarkeit aufgrund mangelnder Nachfrage/Bedarf

6.3 Konstruktives Detail „Auflager“

Die Auflagerpunkte einer Tragkonstruktion spielen zwar eine eher untergeordnete, aber keinesfalls unwichtige Rolle. Bei der Wahl der richtigen Ausführung ist daher einiges zu beachten.

Die Auflagerpunkte einer, in dieser Arbeit balkenförmigen, Tragkonstruktion geben die Länge der jeweiligen Felder und somit die Spannweite vor. Sie bilden das Bindeglied zwischen der Umgebung und der Tragkonstruktion mit der Aufgabe eine gewünschte Lage der Konstruktion zu fixieren. Dabei treten sehr lokal Spannungen im Bereich der Auflagerpunkte auf, welche als Auflagerkräfte in die Umgebung, z.B. ein Fundament, abgeleitet werden.

Hinsichtlich der Lastverteilung unterscheidet man daher zwischen folgenden Auflagerarten:

- Punktelagerten,
- Liniengelagerten und
- Flächig gelagerten Konstruktionen.

Durch diverse Bewegungsmöglichkeiten, auch „Freiheitsgrade“ bezüglich Verschiebung und/oder Verdrehung genannt, der einzelnen Lagerungsarten unterscheidet man darüber hinaus zwischen:

- festen Auflagern,
- beweglichen Auflagern (z.B. auf Rollen oder Gleitplatten) und
- Einspannungen (Kräfte in alle Richtungen und Momente).

Durch Auflager werden die verschiedenen Bewegungsmöglichkeiten eingeschränkt, so dass die Tragkonstruktion im „statischen Gleichgewicht“ gehalten wird. Das bedeutet nichts anderes, als dass die entstehenden Reaktionskräfte bzw. Auflagerreaktionen im Gleichgewicht zur Belastung der Tragstruktur stehen.

Da auch hier wieder, während dem Entwurf bzw. der Bemessung, meistens der wirtschaftliche Aspekt im Vordergrund steht, ist eine nicht zu pflegeintensive und montagefreundliche Lösung zu finden, welche den gestellten Anforderungen und Belastungen gerecht wird.

Für die in den Beispielen gewählten Konstruktionen wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Generierung der Auflagerpunkte verzichtet, da es sich um relativ simple Biegeträger auf 2 „Stützen“ handelt. Im statisch bestimmten System wurde je ein Fest- und Loslager (siehe Abbildung 6.3.1) verwendet, welche in den gewählten Beispielkonstruktionen wenig Einsparpotenzial bieten.

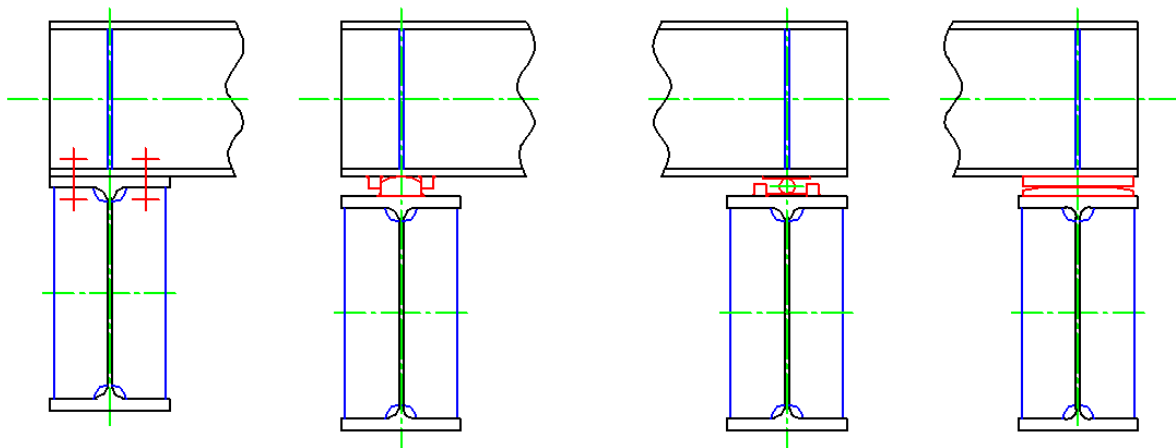


Abbildung 6.1.3 je 2 Beispiele für Fest- und Loslager

7.0 Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigte sich mit Variantenvergleichen verschiedenster Tragwerkkonstruktionen aus Stahl in Fachwerkform. Im Speziellen wurde dabei untersucht, ob eine externe Vorspannung zu einer wirtschaftlichen Alternative für stützenfreie Konstruktionen führt.

Zu Anfang wurden Grundlagen zu Tragwerken und zum Vorspannen erläutert bevor vier Konstruktionsvarianten ausgewählt und erläutert worden sind. Diese verschiedenen Varianten wurden, nach Klärung der Randbedingungen, einmal ohne und einmal mit Vorspannung betrachtet um Vor- und Nachteile sowie verschiedene Auswirkungen verdeutlichen zu können. Da für Vergleiche verschiedene Aspekte ausschlaggebend sind wurden hierfür die drei wichtigsten ausgewählt. Mit den gewählten Tragstrukturen, Spanngliedverläufen, Spannkraften und Profilquerschnitten der vier Varianten wurden die verschiedenen Auswirkungen einer Vorspannung auf die generierten Tragwerke erläutert, gegenübergestellt und miteinander verglichen. Aufgrund der Tatsache, dass sich eine Vorspannung auf jede Tragstruktur unterschiedlich auswirkt hätten auch deutlich mehr als vier Varianten generiert werden können.

Die Variantenvergleiche haben deutlich gezeigt, dass eine Vorspannung von Fachwerkträgern im Stahlbau einen wirtschaftlichen Vorteil bieten kann, was jedoch von Konstruktion zu Konstruktion unterschiedlich groß ausfallen kann. Dies ist in erster Linie von dem realisierbaren Spanngliedverlauf abhängig. Trotz dem zu kalkulierenden Mehraufwand für den Vorgang der Vorspannung führt diese oft zu einer günstigen Alternative im Vergleich zu herkömmlichen Fachwerkkonstruktionen, da sich mit Hilfe der Vorspannung fast immer das Gesamtgewicht der Konstruktion reduzieren lässt. Ein weiterer, eher indirekter Vorteil, da er aus der Gewichtsreduzierung resultiert, ist die Vergrößerung der Stützweiten. Die Nachweise zur Gebrauchstauglichkeit zeigten deutlich, wie sich aus dem Zusammenwirken der Vorspannung und der resultierenden Gewichtseinsparnis geringere Verformungen erzielen ließen. Dies kann gerade für stützenfreie Dach- und Abfangkonstruktionen von hoher Bedeutung sein.

Die Variantenvergleiche dieser Diplomarbeit scheinen jedoch auch zu bestätigen, dass das Vorspannen von Fachwerkträgern im Stahlbau (noch) nicht sehr weit verbreitet ist, verglichen z.B. mit dem Stahlbetonbau. Dies behinderte die Recherchen zum gewählten Thema enorm und in einem vorher deutlich

unterschätzten Umfang. Dies lässt sich voraussichtlich auf das kostenintensive Equipment für den Spannvorgang zurückführen, welches allerdings nur einmalig anfallen würde. Die vorgelegte Diplomarbeit konnte nur sehr wenige bis gar keine Erklärungen für die geringe Verbreitung und den seltenen Einsatz der Vorspannung im Stahlbau finden und aufzeigen. Da es sich bei dem Zusatzequipment aber eins zu eins um die wiederverwendbare Ausrüstung des Stahlbetonbaus handelt, können die zusätzlichen Beschaffungskosten oder eine zu kleine Produktpalette unmöglich die einzigen Erklärungen sein.

8.0 verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

EN Europäische Norm

ISO Internationale Organisation für Normung
(*International Organization for Standardization*)

Ø Durchmesser

N_d Bemessungswert der Normalkraft [kN]

A Querschnittsfläche [cm²]

δ_d Bemessungswert der vorhandenen Spannung [kN/cm²]

$\delta_{R,d}$ zulässige Grenzspannung [kN/cm²]

$N_{pl,d}$ plastische Grenznormalkraft [kN]

s_k Knicklänge [cm]

β Knicklängenbeiwert (für einen beidseitig gelenkig gelagerten Stab = 1,0)

l Länge / Stablänge [m, cm, mm]

i Trägheitsradius [cm]

λ_k Schlankheitsgrad

λ_a Bezugsschlankheitsgrad (S235, $t \leq 40\text{mm} \rightarrow 92,9$)

$\overline{\lambda}_k$ bezogener Schlankheitsgrad

κ Abminderungsfaktor

$M_{y,d}$ größter Absolutwert des Biegemomentes um die y-Achse [kNm]

$M_{pl,y,d}$ plastisches Grenzmoment um die x-Achse [kNm]

$M_{Ki,y,d}$ ideales Biegedrillknickmoment um die y-Achse [kNm]

b Flanschbreite [cm]

t Flanschdicke [cm]

h Profilhöhe [cm]

E Elastizitätsmodul (Stahl = 21000 kN/cm²)

I_y Trägheitsmoment bezogen auf die Querschnittsachse y [cm⁴]

γ_M Bemessungsbeiwert (1,1)

$N_{Ki,z,d}$ Bemessungswert der Normalkraft für Ausweichen senkrecht zur z-Achse [kN]

$\beta_{M,y}$ Momentenbeiwert für Biegedrillknicken

k_y Faktor zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs

V Vorspannkraft der einzelnen Spannelemente [kN]

$P_{0,max}$ zulässige Grenzzugkraft eines Spannelementes [kN]

f_{vorh} Maximalwert der vorhandenen Durchbiegung [cm]

f_{zul} zulässige Durchbiegung bzw. Verformung [cm] (l/300)

- t_1 Wanddicke Tragprofil [mm]
- b_1 Profilbreite Tragprofil [mm]
- t_2 Wanddicke aufgesetztes Profil [mm]
- b_2 Profilbreite aufgesetztes Profil [mm]
- red_t reduzierte Wanddicke, bei der das Hohlprofil spannungsmäßig zu 100%
 ausgelastet wäre [mm]
- g Spaltbreite [mm]

9.0 Quellenverzeichnis

- |1| Internet: [http: www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)

- |2| Literatur: „Tragwerke“, Autoren: Anton Pech, Andreas Kolbitsch, Franz Zach
Veröffentlicht von Springer, 2007; ISBN 3-211-33031-3

- |3| Literatur: „Grundlagen der Tragwerklehre 1“ Autoren: Krauss, Führer, Neukäter
Veröffentlicht von Müller, 1999; ISBN 3-481-01602-6

- |4| Literatur: „Grundlagen der Tragwerklehre 2“ Autoren: Krauss, Führer, Willems
Veröffentlicht von Müller, 1997; ISBN 3-481-01270-5

- |5| Normen: „DIN 18800 – Stahlbauten“

- |6| Literatur: „Stahlbeton- und Spannbetontragwerke“ Autoren: Bieger, Lierse, Roth
Veröffentlicht von Springer, 1995; ISBN 3-540-58799-3

- |7| Literatur: „Vorgespannte Stahlkonstruktionen“ Autoren: Brodka, Klobukowski
Veröffentlicht von Ernst Wilhelm + Sohn, 1982; ISBN 3-433-00119-7

- |8| Literatur: „Bautabellen für Ingenieure“ Autor: Klaus-Jürgen Schneider
Veröffentlicht vom Werner Verlag, 2002; ISBN 3-8041-4190-0

- |9| Normen: „DIN 1045 – Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton“

- |10| Internet: [http: www.suspa-dsi.de](http://www.suspa-dsi.de)

- |11| Bauaufsichtliche Zulassung: Z-13.3-85
Spannverfahren SUSPA-Draht EX der SUSPA-DSI GmbH

- |12| Literatur: „Stahlbau-Profile“ Autorin: Dipl.-Ing. Martha Schneider-Bürger
Veröffentlicht vom Verlag Stahleisen GmbH, 2001; ISBN 3-514-00669-5

- |13| Preisvergleiche gängiger Stahllieferanten für Systemstahlbau mit Hilfe der Einkaufsabteilung der Förderanlagen Magdeburg GmbH
- |14| Internet: [http: www.images.google.de](http://www.images.google.de)
- |15| Normen: „DIN 18808 – Tragwerke aus Hohlprofilen“

10.0 Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Mathias Röhrmann, dass ich die eingereichte Diplomarbeit mit dem Titel „Erörterung von Unterschieden zwischen vorgespannten und nicht vorgespannten Stabtragwerken aus Stahl mit Hilfe von Variantenvergleichen“ in allen Teilen selbständig, ohne unerlaubte Beihilfe verfasst und keine anderen als die im Quellenverzeichnis aufgeführten Hilfsmittel (einschließlich elektronischer Medien und Online-Quellen) verwendet habe. Ich bestätige, dass ich die entsprechenden Bereiche und die wörtlich oder sinngemäß übernommenen Textstellen als solche kenntlich gemacht habe und diese dem jeweiligen Verfasser oder der Quelle zuzuordnen sind. Ich bestätige darüberhinaus, dass diese Arbeit weder als Ganze noch in Teilen bereits zur Abgeltung von Studienleistungen an einer anderen Hochschule, Universität oder anderen Ausbildungseinrichtung eingereicht worden ist und zukünftig durch mein Zutun als solches eingereicht werden wird.

.....

Ort, Datum

Unterschrift